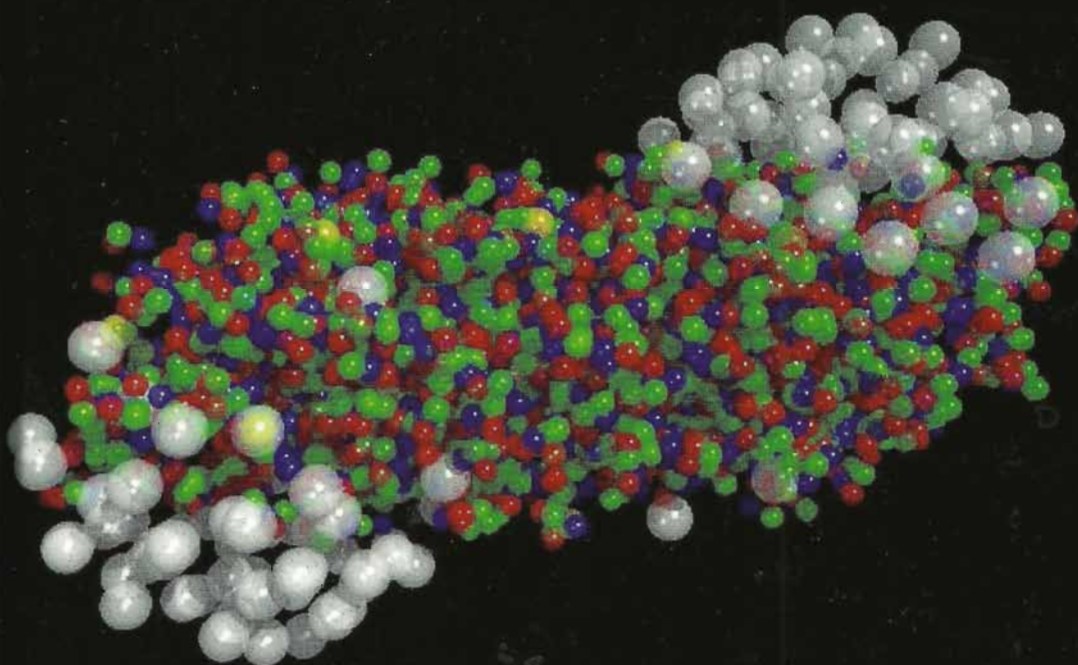


La materia extrema

Estados exóticos de la materia
en el cosmos y en el laboratorio



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigirización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoeau.blogspot.com/>

La materia extrema

Estados exóticos de la materia
en el cosmos y en el laboratorio

RBA

Imagen de cubierta: Simulación de fotografía instantánea de una colisión entre dos núcleos de oro a 0,99998 veces la velocidad de la luz. Esta es la imagen teórica de las colisiones que se producen en el Large Hadron Collider (CERN, Ginebra).

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Enrique Ruiz Arriola por el texto

© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.

© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 62d; CERN: portada; Wellcome Library, London: 62i.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8567-6

Depósito legal: B-13302-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Números extremos 15
CAPÍTULO 2	Normalidad extrema 31
CAPÍTULO 3	Tamaños extremos 55
CAPÍTULO 4	Velocidades extremas 69
CAPÍTULO 5	Interacciones extremas 97
CAPÍTULO 6	Densidades extremas 115
CAPÍTULO 7	Temperaturas extremas 135
CAPÍTULO 8	Los extremos se tocan 161
LECTURAS RECOMENDADAS	171
ÍNDICE	173

La materia extrema no debe su condición a un único estado físico. En realidad, todo aquello que nos hace considerar hostil e inhabitable un entorno puede someter a la materia a una situación extrema. Puede ser por estar el ambiente muy frío o muy caliente, por parecer vacío o extremadamente lleno, o por tener una presión excesivamente alta, un campo electromagnético muy intenso o una gravedad insoportable.

La especie humana ha evolucionado precisamente porque la adaptación al medio ha sido necesaria (y posible). Una alta mutabilidad ayuda a sobrevivir a una inexorable selección natural, pero un alto nivel de organización y especialización impide cambios rápidos. El tejido cerebral, parte del cual se conoce como materia gris, con su increíble nivel de organización es también un producto de la evolución y a la vez una forma poco comprendida de materia extrema que es la esencia de la vida inteligente. Los humanos hemos querido anticiparnos a los cambios naturales que podrían pillarnos por sorpresa y amenazar nuestra existencia como especie. Por eso, ya no nos conformamos con la selección natural. Parte de nuestro inconformismo requiere que nos fijemos en todo aquello que no parezca normal, cualquier ligera

variación de la hoja de ruta puede ser la señal, la punta de un iceberg de algo más profundo que nos enfrente a lo desconocido. Los grandes científicos de la Antigüedad abrieron un camino de exploración por el que ellos y sus sucesores han escrutado la estructura de la materia, descubriendo detalles asombrosos de su naturaleza y su conducta, tanto a escala microscópica como cósmica, en el orden de las fracciones de segundo y en el de los millones de años. El mayor descubrimiento de la humanidad es probablemente la constatación de que el todo es la suma de las partes, de que los átomos formados por electrones y quarks conforman el universo que conocemos.

Se estima que en su mayor parte el universo está formado por materia oscura, algo que no podemos ver con ninguna radiación conocida, aunque sus efectos se dejan sentir. Tampoco sabemos qué hay dentro de un agujero negro y solo podemos intuirlo escarbando en su pasado. No es la primera vez que navegamos en las aguas abiertas del desconocimiento sin avistar la costa. La radiactividad fue una forma de energía oscura, que solo se consideró identificada cuando se la pudo asociar con formas de materia o energía observables. Lo que antaño se consideraba materia extrema ya no lo es ahora en bastantes casos, y hay que reconocer que el concepto de condiciones extremas le ha ido pisando los talones a la frontera del conocimiento.

La pregunta clave es hasta qué punto un trozo minúsculo de materia sigue siendo materia, y la única forma de saberlo es comprobando que su comportamiento no dependa crucialmente de su tamaño. Así que si partimos un trozo de materia en dos trozos iguales esperamos que sus propiedades sean similares. Si pensamos en la densidad, por ejemplo, esperamos que para un sistema homogéneo esta sea constante. ¿A partir de qué momento pasamos, desde la perspectiva de la física, de un sistema macroscópico a uno microscópico? La ciencia sigue estudiando esta intrigante frontera en la que se hallan los sistemas «fronterizos», los denominados mesoscópicos.

Los sistemas con muchas partículas presentan comportamientos muy regulares. Las leyes estadísticas de los grandes números garantizan que así sea. En cambio, si el número de partículas es

pequeño podemos esperar que surjan importantes fluctuaciones. Por tanto, cuando hablamos de materia estamos pensando en comportamientos colectivos, donde los movimientos espasmódicos sean infrecuentes.

La materia nos evoca algo tangible y sustancial, y eso es porque asociamos materia con masa. Pero la masa no se conserva. Cuando quemamos algo o el calor se desprende, ello hace que si pesamos los reactivos y los productos antes y después de la reacción obtengamos un peso distinto. Esto no es nada obvio, ya que la ganancia o pérdida de masa es pequeñísima e indetectable con las mejores balanzas en las reacciones químicas. Cuando Einstein propuso su teoría de la relatividad, encontró que el calor de reacción está relacionado con el cambio de masa, y el efecto se hace más patente en las reacciones nucleares y en todos los procesos causados por las interacciones nucleares fuerte y débil.

Pero ¿qué pasa cuando pulverizamos una gran cantidad de materia? ¿Cuándo deja algo de llamarse materia si lo desmenuzamos en trocitos cada vez más pequeños? La existencia de materia siempre deja pistas tangibles y cuantificables, pase lo que pase con ella. Por tanto, no es una cuestión puramente semántica, el nombre está bien puesto. La materia sigue siendo materia, lo único que puede cambiar es su nivel de agregación, y eso lo definimos como el estado de la materia. Tampoco es una cuestión meramente geométrica: romper la materia cuesta energía y eso implica llevar bien la contabilidad para saber si perdemos o ganamos energía, o expresado con el símil doméstico de la calefacción, si tenemos que calentar el sistema o este nos calienta a nosotros. Densidad, presión y temperatura definen esos grados de agregación a nivel macroscópico, y las leyes mecánicas que rigen el movimiento y las interacciones de los átomos dejan su impronta indeleble en la ecuación de estado, un peaje microscópico que nos recuerda que las tres magnitudes no son independientes.

Los átomos agregados conforman la materia con la que nos sentimos más familiarizados, los sólidos y los líquidos. Los gases no tienden a agregarse sino todo lo contrario, quieren expandirse. No obstante, si bajamos la temperatura vuelven a formar un líquido o un sólido, y eso es porque en el fondo se atraen. Esto es

algo que James Prescott Joule y William Thomson descubrieron experimentalmente a mediados del siglo XIX cuando observaron que si un gas se expandía dentro de un recipiente aislado térmicamente, la temperatura del gas bajaba. Dado que las moléculas en los gases en condiciones normales de presión atmosférica y temperatura de 25 °C se encuentran a una distancia media de veinte veces su propio tamaño y la temperatura representa la energía cinética, no queda más remedio que su expansión sea frenada por unas fuerzas de atracción de largo alcance. Con una intuición formidable, Johannes Diderik van der Waals usó estas observaciones para escribir una relación entre presión, volumen y temperatura para algunas sustancias en estado gaseoso en condiciones normales. Su ecuación permitía predecir teóricamente la licuefacción de los gases a la presión atmosférica y por pura refrigeración, cosa que llevó a cabo en el laboratorio, licuando por primera vez en la historia el monóxido de carbono. Inició así la ciencia del frío o criogenia. Las fuerzas que generaban esas atracciones invisibles entre átomos neutros separados desafiaban las leyes de la electricidad propugnadas por Faraday, principal fedatario de la divisibilidad de los átomos que, aunque eléctricamente neutros, contienen cargas positivas y negativas visibles en la electrólisis. ¿Cómo pueden atraerse partículas con carga cero? Fue en 1930 cuando Fritz London, usando la flamante y recién estrenada mecánica cuántica, dedujo teóricamente las fuerzas vaticinadas por Van der Waals. Estas fuerzas son las causantes de la cohesión de polímeros y plásticos, permitiendo además que dos placas metálicas se atraigan en el vacío. Tal fuerza de succión es de origen puramente cuántico: el llamado efecto Casimir es algo así como el principio de Arquímedes a la inversa. Los efectos cuánticos se magnifican cuando la temperatura es muy baja y el condensado de Bose-Einstein produce espectaculares efectos cuánticos colectivos a temperaturas de cienmillonésimas de grado, las que más se han acercado al cero absoluto (-273,15 °C, la temperatura más baja permitida por las leyes de la física).

Pero los átomos no son indivisibles. Podemos romperlos de muchas maneras. La más sencilla y fácil es ionizarlos, es decir,

separar de ellos un electrón o varios. Esto se puede hacer sometiendo al átomo a un campo eléctrico, como ocurre en el tubo fluorescente, calentándolo como en la llama o el plasma o incluso presionándolo contra otro fuertemente para que los electrones pasen de un átomo a otro y su contorno se desdibuje. Esto último es lo que pasa en los metales, donde los electrones circulan libremente cuando se les aplica una diferencia de potencial, generando la corriente que circula por los circuitos eléctricos.

Podremos acabar separando todos los electrones del núcleo atómico, pero para eso los campos eléctricos, las temperaturas o las presiones ya han de ser brutales. Ese estado totalmente ionizado conforma el plasma, y se necesitan, como en el Sol, millones de grados para conseguirlo. Hasta aquí las fuerzas involucradas son de origen electromagnético y se deben a las interacciones entre cargas y corrientes. Este es el ámbito exclusivo de la electrodinámica cuántica, donde se aúnan la mecánica cuántica, la teoría especial de la relatividad y el electromagnetismo. Los componentes básicos son iones, electrones y fotones, aunque a diferencia de los iones y electrones que llevan tanto masa como energía, los fotones solo llevan energía, y no se consideran materia; en las reacciones químicas a veces los vemos como el calor que se desprende o que necesitamos para iniciar la reacción.

Pero una vez que tenemos el núcleo atómico separado de los electrones, podemos seguir, empezando por arrancar protones y neutrones, desmontando así el núcleo. Aquí tenemos que introducir nuevas interacciones, como es el caso de la interacción fuerte, que hace que protones y neutrones se sientan atraídos formando el núcleo atómico. Además tenemos que introducir nuevas partículas, los mesones, que son portadores de masas aunque efímeros y mutantes. El núcleo atómico de los elementos pesados como el plomo o el oro se comporta como una gota de agua, pero su densidad es un trillón de veces mayor, sugiriendo la existencia de la materia nuclear. Podemos comprimir más, incluyendo muchos núcleos en un plasma frío y cuántico de electrones que podríamos llamar materia electronuclear, y que limita su propia compactación debido a las fuerzas cuánticas originadas en la indistinguibilidad de los electrones.

Sin embargo, antes de que rompamos el núcleo, la naturaleza ha previsto una cláusula en letra pequeña, donde dice que si mantenemos más de un cuarto de hora al neutrón fuera del núcleo probablemente se desintegre en un protón, un electrón y un antineutrino. Esto se debe a la interacción débil y es la causa de la emisión beta, es decir, de la generación de partículas beta (electrones y positrones), en los núcleos atómicos. Fue Fermi el que en 1933 vislumbró la teoría de tales desintegraciones y que ha resultado ser una aproximación de la teoría de Glashow, Salam y Weinberg de hace cuarenta años, que unificaba además la interacción débil con la electrodinámica cuántica. Por tanto, si rompemos el núcleo y actuamos rápidamente podemos ignorar las desintegraciones débiles. Esto permite dar una definición de materia, que en realidad es una idealización, pero que funciona muy bien en la mayoría de los casos prácticos, dado que el número de protones Z y el número de neutrones N se conservarían por separado. Cuando no es así, podemos retomar nuestro plasma frío y cuántico de electrones repleto de núcleos y dejar que los protones se combinen con los electrones para formar neutrones y dejar escapar neutrinos. El colapso del sistema es total y tendremos materia neutrónica, alcanzándose con ello una densidad de cinco veces la de la materia nuclear. El récord de la densidad de materia fría.

Finalmente, podemos romper los neutrones y los protones y producir quarks y gluones, que son los últimos constituyentes de la materia. Fritzsche, Leutwyler y Gell-Mann escribieron en 1973 las ecuaciones de la teoría que bautizaron como cromodinámica cuántica (abreviada QCD por sus iniciales en inglés: *Quantum Chromo Dynamics*) con todas las bendiciones de la comunidad científica. Esta teoría, aunque difícil de manejar por su extraordinaria complejidad, tiene muchas papeletas para ser correcta y precisa; no hay hasta la fecha objeciones serias y no porque no se hayan buscado posibles desviaciones tanto teórica como experimentalmente.

Si tomamos materia neutrónica, donde los neutrones se encuentran codo con codo, y comprimimos un poco más, podemos esperar que los quarks pasen de uno a otro libremente formando

materia quarkónica fría. Pero al igual que el plasma electromagnético caliente, también podemos calentar aquí y bajar la presión para conseguir un sistema caliente y cada vez menos denso formando un plasma de quarks y gluones hasta llegar a un espacio vacío de materia y caliente. Sí, el vacío se puede calentar.

Sin embargo, en el proceso de ir troceando la materia tenemos que atender a leyes de conservación que dictan qué puede y qué no puede ocurrir. En física, una ley de conservación expresa la constancia en el tiempo de alguna magnitud. Aunque ahora son algo corriente, llevó mucho tiempo y experimentos establecer qué cosas no cambian. Se conservan la energía y el momento en los choques, se conserva la carga eléctrica total. El número conjunto de protones y neutrones y el número de leptones y la carga eléctrica siempre se conservan. El número total de protones y neutrones se llama número másico en física nuclear ($A = N + Z$), y se conservaría de no ser por las interacciones débiles. En su lugar, el número bariónico, $B = Z + N + Y$, que incluye una nueva cantidad llamada hipercarga Y por su analogía con la carga eléctrica, se conserva siempre. Fue descubierta en 1951 al detectarse el llamado hiperón Λ , que está formado por otra especie de quarks ajena a las que forman el protón y el neutrón, pero en este caso tendremos que hablar de hipermateria, que pesa más que la materia y podría quitarle el récord de densidad extrema a la materia neutrónica mediante una suerte de hipermateria quarkónica. Es precisamente mediante el principio de conservación del número bariónico que encontramos una forma de definir técnicamente la cantidad de materia, que incluye la posibilidad de hipermateria. Independientemente de cómo de juntos estén los constituyentes, el número bariónico es siempre el mismo. El protón, el neutrón y el hiperón Λ son todos portadores, con $B = 1$, mientras que para los quarks $B = 1/3$. Todas las demás partículas, los fotones, mesones y los gluones, tienen $B = 0$. Por eso, se podría definir la materia de este modo: «Materia es aquello que tiene número bariónico mayor que cero».

La antimateria es aquello que tiene por tanto número bariónico menor que cero. Y ¿qué es aquello que tiene número bariónico igual a cero? Puede ser el vacío, pero también puede ser radia-

ción. De hecho, cuando calentamos el vacío, se genera radiación. Eso ocurre porque el vacío, pese a parecer que no contiene nada, está repleto de igual cantidad de materia que de antimateria agazapadas, aguardando a la más mínima provocación para manifestarse. Nuestro recorrido comprimiendo desde la materia nuclear, pasando por la materia electronuclear, neutrónica y quarkónica frías, para luego acabar calentando y descomprimiendo en un plasma caliente de quarks y gluones y casi vacío, podría haberse realizado a la inversa. Puede dibujarse como una línea en el diagrama de las fases, un mapa que cartografía todos los estados de la materia normal y la extrema parcelando la jurisdicción de cada una, según su densidad bariónica y su temperatura. Aquí los extremos se tocan en un punto crítico, un lugar ignoto donde las diferencias entre el gas hadrónico y el plasma gluónico se hacen imperceptibles y cuya localización exacta, aún incierta, se busca ávidamente.

Según Frank J. Tipler, es posible construir una máquina del tiempo, es decir, compaginar las singularidades del espacio-tiempo con el principio de causalidad en la teoría de la relatividad general, siempre y cuando alguna materia pase por condiciones extremas, probablemente muchísimo más extremas que las que trataremos en este libro.

Números extremos

Las condiciones extremas se caracterizan por números anormalmente grandes o pequeños. Es preciso desarrollar y entender el lenguaje matemático que permite resumir la información más relevante en esos números para dibujar el mapa de las condiciones extremas de la materia.

Cuando nos referimos a la materia en condiciones extremas pensamos en un número excepcionalmente grande o pequeño. Sin embargo, los números extremos no son prerrogativa exclusiva de las condiciones extremas y, de hecho, ocurren en situaciones normales, o al menos en aquellas que nos lo parecen a los humanos. Es una cuestión de unidades.

En efecto, qué es grande y qué es pequeño depende de las unidades que utilicemos. La estatura de un niño que mida un metro de alto resulta ser ínfima si la medimos en kilómetros y gigantesca si la medimos en micras. Nuestro peso es enorme si lo expresamos en miligramos y pequeñísimo si lo enunciamos en toneladas. El tiempo de vida medio de una persona, unos 80 años, parece una eternidad si lo expresamos en microsegundos y apenas un instante si lo hacemos en millones de años. Desde luego, podríamos hacer trampa y tratar todas las situaciones como si fuesen extremas. Lo cierto es que la mayoría de las personas miden entre 1 y 2 m, pesan entre 50 y 100 kg y viven entre 70 y 80 años; que midan, pesen o vivan 10 veces más o 10 veces menos es algo que consideraríamos sin lugar a dudas excepcional. Pero lo realmente importante es que los números que tene-

Uno no puede afirmar que tiene conocimiento de un hecho hasta que puede medirlo de alguna manera, y hacerlo implica la existencia de unidades de medida.

LORD KELVIN

mos en una situación normal son sencillos precisamente porque los expresamos en unidades elegidas a la carta. Esto representa además una ventaja, puesto que los números se hacen manejables y contienen pocos dígitos. Las operaciones matemáticas que realicemos con ellos serán más sencillas y las posibilidades de cometer errores son menores. Si en lugar de estudiar personas queremos estudiar microorganismos, las unidades a la carta serán distintas. En resumen, la utilización de unidades adecuadas facilita que nos ubiquemos mentalmente e impide que cometamos muchos errores numéricos de cálculo.

Como existe una gran cantidad de fenómenos físicos, el menú de las unidades a la carta es muy extenso y variado, y se escribe en ¡distintos idiomas! El ejemplo que nos resulta más familiar es el Sistema Internacional de unidades (SI). Es la evolución del sistema métrico antiguo, el cual constaba de diferentes grupos de unidades como el sistema CGS (basado en el centímetro, el gramo y el segundo) y el MKS (basado en el metro, el kilogramo y el segundo). El SI es ampliamente utilizado en todo el mundo excepto en los países de tradición anglosajona, donde se emplea el *sistema imperial* con longitudes en pulgadas y el peso en libras. Lógicamente, es muy importante que nos pongamos de acuerdo en qué unidades manejar, o en su defecto disponer de un diccionario de unidades que permita traducir, compartir y contrastar los resultados finales de las medidas o cálculos una vez que se hayan realizado. No hace tanto, el desastre de la sonda espacial MCO (*Mars Climate Orbiter*) de la NASA, que se estrelló en Marte, ocurrió precisamente por un problema de confusión en el sistema de unidades. Estos errores, por garrafales que parezcan, no son tan infrecuentes, aunque no siempre trasciendan al público o sean subsanados a tiempo de evitar consecuencias fatales.

Pues bien, aun cuando nos hayamos puesto de acuerdo en utilizar el mismo sistema de unidades, cada rama de la ciencia tiene las suyas propias, y en cada libro que estudie distintos fenómenos

físicos o naturales es obligado encontrar un capítulo sobre las unidades que se utilizarán. Esto no es por un mero capricho de los autores o su incapacidad para ponerse de acuerdo, sino que se debe a la gran disparidad de tamaños, tiempos o pesos típicos de los fenómenos estudiados en cada caso. En este libro pretendemos precisamente la difícil tarea de abarcar fenómenos muy dispares para discernir entre lo que consideramos condiciones normales y lo que podemos calificar como condiciones extremas.

UNIDADES NATURALES Y ANTROPOMÓRFICAS

Gran parte de la actividad humana sobre la naturaleza tiene que ver con la curiosidad por entenderla, pero también surge como una necesidad práctica de aspirar a mejores condiciones de vida. Muchos de los problemas que la ciencia ha resuelto en sus inicios han sido consecuencia directa o indirecta de dificultades más o menos cotidianas. Por eso, las unidades de longitud, tiempo o masa con las que estamos más familiarizados tienen que ver con nuestro propio tamaño, nuestro peso o la duración del día solar. Gracias a ello, podemos percibir con mayor claridad la magnitud de medidas que no son las comunes de lo que nos rodea en nuestra vida doméstica y a veces ni siquiera en la profesional.

Sin embargo, aunque el ser humano trata de dominar la naturaleza, lo cierto es que en términos generales la naturaleza domina al hombre y somos realmente un subproducto de la misma. Por tanto, las unidades de medida para la naturaleza no tienen en principio nada que ver con las unidades de medida para el ser humano. Esto es algo en lo cual los físicos han trabajado durante mucho tiempo, buscando procesos que ocurran en la naturaleza y que permitan calibrar de una forma reproducible la longitud, el tiempo o la masa. Lo interesante es que las unidades «naturales» para la naturaleza resultan ser números extremos para los humanos.

Porque la calificación de grande o la de pequeño para un cuerpo dependen de con qué lo comparemos. Las constantes fun-

damentales son aquellas cantidades a partir de las cuales esperamos expresar cualquier magnitud física. Si, por ejemplo, nos referimos a la longitud o al tiempo, la pregunta que se hicieron los físicos fue si había una longitud o un lapso de tiempo especialmente privilegiados en la naturaleza cuyo valor numérico pudiese ser determinado con independencia de las condiciones o del entorno o de las necesidades humanas.

Cuando se dilucidó la estructura atómica de la materia, la respuesta surgió de inmediato: los propios átomos de un mismo elemento no son solo parecidos o similares los unos a los otros, sino que todos son idénticos entre sí. Dos átomos de hidrógeno son siempre iguales, siempre que se encuentren en el estado de más baja energía o *estado fundamental*, estén donde estén, vayan a la velocidad que vayan. Los seguiremos llamando átomos de hidrógeno aunque especifiquemos su posición o coordenadas y su estado de movimiento o velocidad. En esto los átomos de un mismo elemento son totalmente indistinguibles. Sin embargo, las condiciones pueden ser cruciales cuando el número de átomos sea suficientemente grande como para que constituyan un trozo de materia.

LOS NÚMEROS NATURALES

En un principio fueron los números. Contar es una de las primeras cosas que aprendemos a hacer de pequeños y por una buena razón: es algo fácil de hacer y una actividad natural del ser humano civilizado. En este aspecto, tiene sentido que a los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10... se les llame *números naturales*. Leopold Kronecker (1823-1891) consideraba que nuestra forma de entender el resultado de operaciones tan sencillas como una división corresponde a necesidades humanas. Los números enteros incluyen los números naturales (positivos) y sus opuestos (negativos), que provienen de restar dos números naturales. Los números racionales, que provienen de dividir dos números enteros, siempre los podemos expresar como un número natural si elegimos una unidad de medida lo bastante

pequeña. Por ejemplo, $1,242 \text{ kg} = 1\,242 \text{ g}$, o $1,23 \text{ m} = 123 \text{ cm}$. Eso es todo lo que hay que saber de momento, es fácil operar con números naturales. Pero ¿qué pasa si estos números son gigantes? Si multiplicamos dos números naturales el resultado es un número natural, pero el número de dígitos aumenta cada vez. Esto ya puede verse duplicando 100 veces 2 (2^{100}), que nos da: 1 267 650 600 228 229 401 496 703 205 376. Escribir con todos sus ceros 2^{1000} ocuparía un espacio considerable en papel. Así que los números enteros grandes tienen la desventaja de ser inmanejables.

Por increíble que parezca, esta acción tan simple de contar sin fracciones de unidad es en el fondo la base de gran parte de la física cuántica y de la existencia de cantidades

indivisibles, los llamados *cuantos* de materia o energía. Los electrones, neutrinos, fotones, protones, neutrones o las partículas α (alfa) emitidas por los núcleos atómicos o que se producen en el laboratorio en los modernos aceleradores de partículas, o los que viajan a través del espacio desde no se sabe dónde, formando los rayos cósmicos, pueden contarse uno a uno usando detectores de partículas. Esto resulta providencial, ya que, como decíamos al hablar de las unidades naturales, puede que al final las definamos todas simplemente contando, usando las propiedades de la materia. Así que vamos a dedicarnos a analizar con mayor profundidad la contabilidad de las partículas.

Sin entrar en demasiados detalles, un detector es un dispositivo con un trozo de materia que absorbe la energía cinética (debida a su movimiento) portada por las partículas que inciden en él, ionizando átomos. Los electrones liberados producen una carga que podemos convertir en corriente aplicando un voltaje; midiendo la corriente sabemos cuánta energía cinética llevaban las partículas al golpear el detector. La idea es semejante a cuando el agua de un embalse, como consecuencia de la diferencia de alturas, transforma su energía potencial en energía cinética, haciendo girar las palas de una turbina que la transforma en electricidad. En 1908, Hans Geiger y Ernest Rutherford diseñaron el

Dios creó los números naturales;
el resto ha sido obra de los
hombres.

LEOPOLD KRONECKER

primer contador de partículas, que solo era capaz de detectar partículas α (que son núcleos de helio-4). Estas eran contadas pacientemente y anotadas en un cuaderno. Hoy en día son registradas por un superordenador cuando llegan a un detector, almacenándose los resultados en un disco duro con una capacidad monumental. Lógicamente, esto permite llevar a cabo la contabilidad de forma mucho más eficiente y automática, pero la idea básica es la misma: contar uno a uno sin perder la cuenta. Lo único que no podemos hacer es contar o dejar de contar una fracción de partícula. Desde un punto de vista contemporáneo y práctico puede que, después de todo, Kronecker llevara razón. Todo está cuantizado a nuestros ojos; en ese sentido nadie medirá nunca un número tan grande como infinito ni tan pequeño como cero. Nadie se equivocará en una fracción de más o de menos al contar algo; el error más pequeño siempre será de un número.

Aunque la cuantización de la energía y de la materia parece simplificar las cosas, dado que al final solo tenemos que manejar números enteros, lo cierto es que para el mundo cotidiano, donde el número de átomos que hay en un trozo de materia es inmenso, supone una complicación, porque implica que nos manejemos con números descomunales. Veamos esto con un ejemplo financiero, poniéndonos en el lugar de un economista puntilloso. Es como si cuando hacemos la contabilidad de un país quisiéramos ajustar hasta el céntimo de euro, que es la mínima cantidad de dinero que podemos contabilizar, ¡porque el dinero también está cuantizado! En España el producto interior bruto (PIB) en 2014 fue según datos oficiales de 1058469 millones de euros. El mero hecho de dar ese número de tal guisa presupone un error de hasta casi un millón de euros, dado que con toda seguridad el número exacto no fue ese, es decir, 105846900000000 céntimos de euro (hemos añadido ocho céntimos), ni un céntimo más ni un céntimo menos. ¿Con toda seguridad? ¿No decíamos que no podemos estar seguros al cien por cien? Si queremos ser puntillosos tenemos que matizar: la precisión de 1 céntimo de euro que un economista pedante exigiría es de una parte en 100 billones (1 billón = 1 millón de millones).

Así que la probabilidad de que el PIB fuera exactamente ese número es de 1 céntimo en 1 millón, o sea, una parte (1 euro) en 100 millones. Todo esto está muy bien, pero ¿hasta qué punto queremos estar seguros? Cuando queremos saber si tenemos dinero suficiente en la cartera para pagar un billete de tren, podemos hacerlo mirando primero los billetes de 50 euros; si no tenemos ninguno, podemos mirar los de 20 y así vamos bajando. Puede bastar una simple ojeada para saber si cogeremos el tren o no. Ahora bien, si tenemos el dinero más ajustado entonces empezamos a contar con más detalle, y escarbaremos en los bolsillos, porque la diferencia entre poder o no poder coger el tren depende de la precisión. De manera que la precisión que nos importa es relativa y no absoluta. El error más que probable en el PIB que hemos dado es de una parte en 1058469 partes. En otras palabras, estamos casi seguros de que el número está mal, pero el error es del 0,00001 % del total.

El ejemplo anterior nos ilustra otro aspecto interesante y que es consecuencia directa de la cuantización del dinero. Si queremos ajustar la cuenta hasta el céntimo, tendremos el siguiente dilema: ¿cómo contabilizamos muchas cosas que valgan menos de 1 céntimo? Esto es algo que los chatarreros saben muy bien y lo explotan a su favor: compran cosas «sin valor» a coste cero y ¡pueden ganar dinero vendiéndolas! En un mundo de dinero cuántico, esto sería imposible; habría una mínima cantidad de dinero por debajo de la cual nada tendría valor.

Para que nos hagamos una idea de la diferencia entre la contabilidad económica y la física, diremos que la cantidad medida que se conoce con mayor precisión en ciencia es el momento magnético del electrón (una parte en 1 billón). Esto es algo así como medir el perímetro de la Tierra, unos 40000 km, con la precisión del grosor de un cabello, unos 0,06 mm. Pero ¿a quién le importa tanta precisión? Resulta que el *modelo estándar* actual, la teoría que describe las relaciones entre las partículas elementales de la materia con las interacciones fundamentales, predice esa misma cantidad con una precisión de una parte en 1000 millones y a ese nivel todos los dígitos coinciden excepto el último. La discrepancia entre la teoría y el experimento no

se entiende y puede esconder fenómenos físicos completamente desconocidos hasta la fecha, o indicar simplemente que dicho modelo es erróneo. Pues bien, jesto es 100 veces menos preciso que lo que el economista puntilloso hubiera exigido!

CONTANDO ÁTOMOS

La existencia de los átomos se considera hoy en día algo incuestionable, pero no siempre fue así. Hasta hace poco más de cien años, científicos muy respetados negaban su existencia. Ernst Mach, un físico y filósofo austriaco (1838-1916), lideraba una corriente de opinión que negaba la existencia de la realidad física, de manera que según ella todos los fenómenos que observamos serían el resultado de nuestras sensaciones subjetivas. El *principio de Mach*, que establece que las leyes de la física en una región pequeña del espacio vienen condicionadas por la estructura a gran escala del universo, influyó notablemente en la visión del gran Albert Einstein sobre la física y su concepción de la teoría de la relatividad general. Sin embargo, Mach declaró en 1897, tras escuchar una conferencia impartida por Ludwig Boltzmann en Viena: «No creo en la existencia de los átomos», y mantuvo ese punto de vista hasta su muerte. Su oposición a la estructura atómica de la materia fue duramente criticada por Planck, quien veía que la cuantización de la materia y la radiación permitía explicar hechos experimentales que de otra manera eran a todas luces un misterio, y hacía esta recriminación al tomar posesión de su puesto de rector en la Universidad Friedrich-Wilhelm de Berlín en 1913:

Aquellos que reniegan de la fe en la realidad de los átomos y los electrones, de la naturaleza electromagnética de las ondas de luz o de la identidad entre el calor y el movimiento, nunca serán declarados culpables de incurrir en contradicciones lógicas o empíricas, pero les resultará muy difícil desde esta posición avanzar en el desarrollo del conocimiento físico.

El tono de predicador asusta un poco, y si no fuera porque Planck es el padre de la teoría cuántica, probablemente pensaríamos que es la opinión de un demente. Pero esto fue solo unos años después de que Boltzmann, hastiado del acoso moral de sus contemporáneos, se quitara la vida en 1906. De hecho, la mejor manera de probar que los átomos realmente existen es poder contarlos uno a uno, algo que, como veremos más adelante, podemos hacer nosotros mismos en casa. Como Planck sostenía, Boltzmann llevaba razón, pero no vivió lo suficiente como para que sus oponentes se la dieran.

NÚMEROS EXTREMOS EN CONDICIONES NORMALES

En las tribus primitivas de cazadores contar números grandes era una proeza, y además innecesaria, dado que no se utilizaban en la vida corriente, aunque quizá sí para contar el sinfín de estrellas colgando del firmamento. Según explica George Gamow en su libro *Uno, dos, tres... infinito*, el sistema de numeración de los hotentotes (una tribu de la actual Namibia) es especialmente sencillo: uno, dos, tres... muchos. Ya está. La necesidad práctica de contar números mayores surge en el Neolítico, con el pastoreo y la agricultura; se hace preciso contabilizar el ganado y la cosecha para comerciar con ellos. En el antiguo Egipto los escribas, que dominaban la escritura y el cálculo, llevaban la contabilidad de los grandes comerciantes, que no tenían más remedio que creer lo que les contaban. No es de extrañar que como guardadores de secretos o secretarios acumularan un inmenso poder y funcionaran como una secta, restringiendo a placer el acceso a los no iniciados. En la Grecia clásica solo se contaba por escrito hasta diez mil, hasta que el genial Arquímedes introdujo las potencias de 10 000, dando así cabida a los números que la observación de la bóveda celeste iba proporcionando. Nos sentimos tentados de establecer una relación directa entre el grado de civilización y desarrollo y el número más grande que podamos nombrar. El número más grande que podemos encontrar en la naturaleza y que no depende de las unidades que utili-

Tanto los múltiplos como los submúltiplos saltan de uno en uno primero y luego de tres en tres. En la tabla hemos especificado el caso concreto del gramo (g) pero se puede hacer igualmente con cualquier otra unidad. Así, un picrosegundo es $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$, y un nanómetro es $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$.

LA ESCALA LOGARÍTMICA

El logaritmo, útil para simplificar la representación y el manejo de números muy largos, fue introducido por el matemático escocés John Napier en 1614. Los logaritmos decimales, que escribiremos de forma abreviada como «log», son los más utilizados cuando dibujamos gráficas. No hay que confundirlos con los *logaritmos neperianos*, que son los que aparecen de forma natural en las leyes físicas y por lo cual también se llaman *logaritmos naturales*, cuya abreviatura es «ln». Para empezar, recordemos que las potencias de 10 tienen reglas sencillas de combinación:

$$10^{(n+m)} = 10^n \cdot 10^m.$$

Si

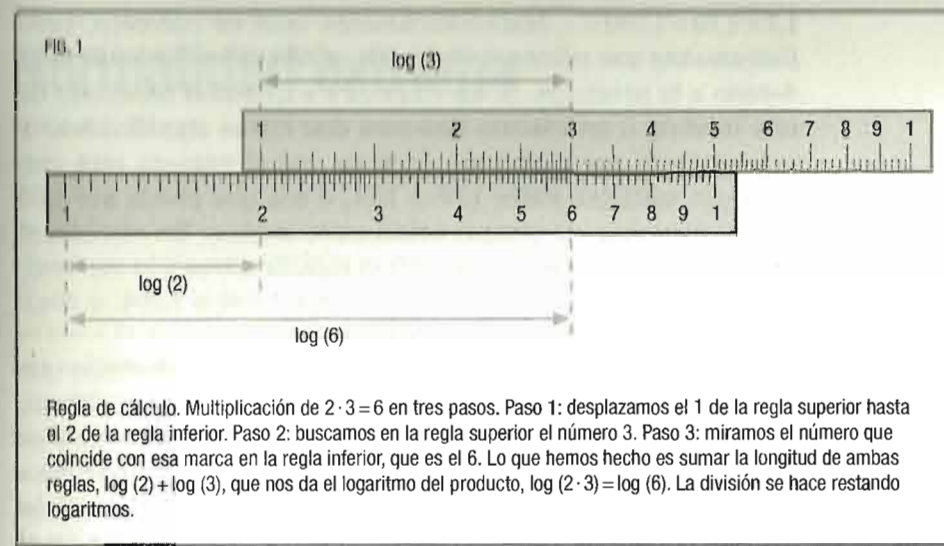
$$a = 10^n \quad \text{y} \quad b = 10^m$$

definimos el logaritmo decimal

$$n = \log a \quad m = \log b$$

lo cual puede leerse como « n es el logaritmo decimal de a » y « m es el logaritmo decimal de b ». Como $a \cdot b = 10^{(n+m)}$ entonces $n + m$ es el logaritmo decimal de $a \cdot b$, es decir

$$\log(a \cdot b) = n + m = \log a + \log b.$$



En otras palabras, el logaritmo del producto es la suma de logaritmos. El logaritmo de la suma no tiene ninguna propiedad especial.

Esto nos permite multiplicar números sumando logaritmos, algo que ya se le ocurrió a Jobst (Joost) Bürgi (1552-1632), un relojero y matemático suizo. Durante los siglos XVII-XIX se construyeron extensas tablas de logaritmos que permitieron realizar complejos cálculos astronómicos y han estado vigentes hasta la irrupción y popularización de las calculadoras de bolsillo, a mediados de la década de 1970. Hoy en día se han convertido en libros viejos que pronto serán piezas de museo. Una aplicación ingeniosa de esta propiedad es construir una regla cuya escala en lugar de ser lineal, es decir, equidistante, sea logarítmica. Si cogemos dos reglas con marquitas «logarítmicas», podemos, deslizando una sobre la otra, sumar sus longitudes y multiplicar números. En la figura 1 mostramos cómo hacerlo.

En los cálculos aproximados se suele hablar de cifras significativas, que no son más que los dígitos del número que consideramos relevantes. Si tenemos un número decimal podemos añadir cuantos ceros queramos a la derecha, por ejemplo:

$1,7 = 1,70 = 1,700 = \dots$ Matemáticamente esto es correcto, pero físicamente son números distintos. ¿Cómo es posible? Ello es debido a la precisión. Si escribimos $x = 1,7$ como resultado de una medida o un cálculo tenemos dos cifras significativas y realmente lo que queremos decir es que el número está con toda probabilidad entre 1,65 y 1,74, o sea que puede ser 1,65 o 1,74, o cualquiera comprendido entre ambos. En cambio, si escribimos 1,70 tenemos tres cifras significativas y lo que realmente queremos decir es que puede ser 1,695 o 1,704, o cualquiera comprendido entre ambos.

Otra forma de verlo es usando las unidades. Si decimos que alguien mide 1,70 m de altura queremos decir que mide 170 cm, pero si decimos 1,700 m, lo que realmente pretendemos decir es que mide 1700 mm. No es lo mismo, porque en el primer caso solo nos hemos fijado en los centímetros de nuestra regla y, por tanto, que mide entre 1695 mm y 1704 mm, mientras que en el segundo caso nos hemos fijado en las marquitas más pequeñas, las de los milímetros, y el error es inferior a esta unidad. Lo interesante de calcular con precisión logarítmica es que el número de cifras significativas se mantiene.

La utilidad de la escala logarítmica es enorme, sobre todo cuando queremos representar números muy dispares que abarquen un amplio intervalo. Cada potencia de 10 se denomina orden de magnitud. Si pensamos en tamaños posibles en la naturaleza podemos ir desde la longitud de Planck ($l_p \approx 10^{-35}$ m) hasta el tamaño del universo observable ($l_u \approx 10^{26}$ m). Por tanto, $l_u = 10^{61} l_p$, hay 61 órdenes de magnitud entre el tamaño más grande y el más pequeño. Esta es la forma en la que se manifiestan el cero y el infinito en lo que se refiere al tamaño. Si dividimos el universo observable en cuadrículas espaciales de forma cúbica tendríamos que el volumen total $l_u^3 = 10^{183} l_p^3$, es decir, tendríamos 10^{183} cuadrículas en total. Si lo comparamos con un sólido cristalino de 1 cm^3 de volumen, el número de cuadrículas en dicho volumen es 10^{60} , un número muchísimo más pequeño, pero descomunal aún. Análogamente podemos hacer lo mismo con tiempos y con masas, en escala logarítmica.

Normalidad extrema

Los estados de la materia más comunes (sólido, líquido, gaseoso y plasma) equivalen a los elementos aristotélicos (tierra, agua, aire y fuego) con los que convivimos diariamente. Casi nada en ellos nos hace sospechar que las extremas irregularidades subyacentes que nos pasan desapercibidas son tan grandiosas como el propio universo.

Si hablar del tiempo atmosférico es un recurso muy frecuente para combatir el silencio o romper el hielo iniciando de forma intrascendente una conversación, las especulaciones en torno a la predicción del mismo generan debates nunca apasionados y siempre resignados al resultado final. Desde luego, el parte meteorológico es algo que valoramos, sobre todo cuando planeamos nuestras vacaciones, y nos enojamos cuando no se cumple. Predecir el tiempo es predecir el futuro, y consultar las previsiones meteorológicas nos ayuda a prepararnos para el mismo.

Por otro lado, la regla más segura, a falta de información adicional, es la de que el tiempo de mañana será el mismo que el de hoy. Con esto nos equivocamos solamente un 60% de las veces si nos referimos a que llueva o no. Según esta *regla de la persistencia* (se llama así) nunca pasaría nada, pero eso depende en realidad de a qué nivel nos refiramos. A escala mundial, las temperaturas medias a lo largo del año cambian muy poco, así que cuando decimos que este o aquel año ha sido más o menos caluroso, en términos porcentuales los cambios son pequeños.

Predecir el tiempo de mañana de forma fiable es otra cosa bien distinta, ya que implica resolver las complejas ecuaciones

de la dinámica atmosférica para un tiempo futuro. Este ejemplo concreto no es tan diferente de los casos más complicados que veremos más adelante, lo que nos permitirá enfocar el asunto desde un punto de vista que nos resulte más familiar.

EL MAPA DEL TIEMPO

El pionero de la predicción meteorológica, Lewis Fry Richardson, tuvo en 1922 la increíble idea de disponer de un ejército de 64 000 operarios con máquinas registradoras haciendo las veces de componentes de un ordenador para resolver en menos de 24 horas las ecuaciones que predecían el tiempo al día siguiente, es decir, justo antes de que ocurriese. Solo con los primeros ordenadores como el ENIAC pudo conseguirse esto en 1954, e independientemente del éxito en la predicción, lo meritorio del asunto fue el anticiparse matemáticamente al suceso real. Desde entonces, el servicio meteorológico de cada país ha gozado de los ordenadores más potentes disponibles y la predicción se hace mundial y rutinariamente para un periodo de dos semanas, aunque a veces falle. Pero ¿qué contienen esas ecuaciones con el poder casi mágico de predecir el futuro? Pues nada más y nada menos que la temperatura, la presión y la densidad del aire en un momento inicial para permitir predecir sus valores horas o días después. Dicho de otra forma, poseyendo el mapa del tiempo de hoy, es teóricamente posible confeccionar el de mañana, el de pasado mañana, y el del día posterior. La relación que hay entre presión, temperatura y densidad es lo que los físicos y químicos llaman *ecuación de estado*, por la sencilla razón de que determina de forma completa el estado del sistema.

Las ecuaciones de la dinámica atmosférica utilizan precisamente la ecuación de estado. El mapa del tiempo no es más que un mapa de presiones donde se unen líneas de igual presión (*isobaras*), como si fuese un mapa cartográfico del relieve, una idea propuesta en 1701 por el astrónomo inglés Edmond Halley, el mismo que da nombre al cometa que pasó en 1986 cerca de la Tierra y volverá a pasar en 2061. El viento va de la zona de altas

presiones a la de bajas presiones. De hecho, la rotación de la Tierra arrastra al viento y con eso genera un movimiento ciclónico hacia el este. Del mismo modo podemos representar un mapa de temperaturas (*isotermas*) o de densidades. Al contrario que la masa o el volumen, la densidad, la presión y la temperatura comparten la propiedad de no depender de la cantidad de materia. Si partimos un trozo de materia por la mitad, la masa y el volumen de cada parte serán la mitad, pero la presión, la densidad y la temperatura serán las mismas.

Densidad

Coloquialmente solemos referirnos a algo denso como algo más pesado. En realidad nos referimos a una mayor concentración de masa en el mismo volumen. Si M es la masa y V el volumen, la densidad ρ es

$$\rho = M/V.$$

El principio de Arquímedes nos permite visualizar la densidad de los objetos de una forma más clara. Si transportamos un objeto varios metros bajo el agua, se quedará aparentemente ingrávido (sumergido pero sin llegar al fondo) si su densidad coincide exactamente con la de este líquido, subirá si es menos denso y bajará si lo es más debido a la acción de la gravedad. Es el mismo motivo por el que un globo lleno de helio, hidrógeno o aire caliente, menos densos que el aire frío, sube en la atmósfera.

Si metemos una pesa de medio kilo en una botella de plástico de un litro y la sumergimos en agua, la botella se sumerge hasta la mitad. Se hundirá hasta la boquilla si ponemos una pesa de un kilogramo. Si ahora llenamos la botella de agua y la sumergimos en un líquido cuya densidad sea la mitad de la del agua, se hundirá hasta la mitad. Precisamente, la densidad de un líquido la podemos determinar así, sin necesidad de medir masa y volumen por separado mediante un densímetro, un dispositivo propuesto por Hipatia de Alejandría en el siglo IV.

Presión

La *presión mecánica* es la fuerza por unidad de superficie:

$$P = F/S.$$

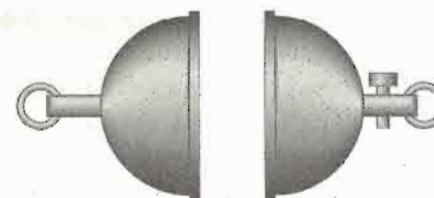
La misma fuerza aplicada sobre una superficie pequeña genera más presión. Esa es la razón por la que se usan raquetas para caminar sobre la nieve blanda sin hundirse o por la que los tacos de aguja se hunden más de lo deseado. Podemos con un alfiler puntiagudo atravesar fácilmente la piel presionando con un dedo, mientras que sin alfiler prácticamente no conseguiremos nada aplicando la misma fuerza. Lo importante es la concentración de esta última.

El usuario típico de bicicleta ha tenido que usar en algún momento la bomba de aire para inflar los neumáticos. De hecho, no es ningún secreto que el número de infladas crece con el volumen del neumático. Si taponamos la válvula con el dedo veremos que se requiere una fuerza enorme para la acción de comprimir. Robert Boyle (1627-1691), autor de *El químico escéptico*, escrito en 1661, y pionero del método científico en química, hizo en 1657 un descubrimiento realmente extraordinario. Traducido a nuestro ejemplo de la bomba de aire, Boyle constató que la fuerza que le aplicamos a esta es inversamente proporcional a la longitud comprimida, es decir, que si empujamos el doble el volumen de aire en el interior se reduce a la mitad. Otra forma de decir lo mismo es que el número de infladas es proporcional al volumen final del neumático.

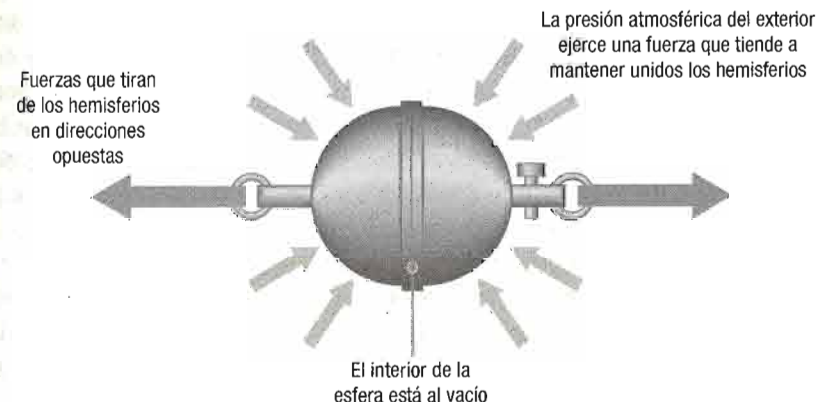
Por otro lado, si comprimimos libremente una jeringa y obstruimos la apertura con el dedo veremos que se requiere una fuerza notable para expandirla. En el caso anterior, era el aire comprimido en el interior el que nos impedía empujar, mientras que ahora es el aire en el exterior el que nos dificulta estirar. Estos hallazgos permitieron a Robert Hooke (1635-1703) construir las primeras bombas de vacío. La presión del agua se transmite en todas las direcciones, y el principio de los vasos comunicantes se basa en que lo que importa para que el agua pase de un

EXPERIMENTO DE LOS HEMISFERIOS DE MAGDEBURGO

Aunque ahora nos puede parecer muy natural, la idea del vacío no era en absoluto del agrado de la mayoría de los científicos hasta mediados del siglo XVII, por pura aversión psicológica a este. El ingenioso experimento de la ciudad de Magdeburgo llevado a cabo hacia 1656 por el científico alemán y burgomaestre de la villa, Otto von Guericke, consistía en tratar de separar dos semiesferas a modo de hemisferios, sin aire en su interior. Con aire dentro, era fácil separarlas. Pero sin aire hicieron falta dos tiros de varios caballos cada uno para lograrlo, demostrando de manera espectacular la existencia del vacío y de la presión atmosférica. En una repetición del experimento, en 2005 en Granada con dieciséis caballos, no se logró separar los hemisferios, probablemente porque el vacío era más perfecto. En cualquier caso, a esas alturas afortunadamente ya nadie dudaba de la existencia de la presión y del vacío.



Hemisferios de una esfera de Magdeburgo



Esquema básico del experimento de las semiesferas de Magdeburgo.

lado a otro es la diferencia de altura entre el comienzo y el final de la manguera; da igual lo que haga en medio la misma, suba o baje. La presión del agua de las montañas sería brutal y si la trájéramos directamente destrozáramos las cañerías.

La presión atmosférica se debe al peso que ejerce el aire encima de nuestras cabezas hasta las altas capas de la atmósfera terrestre. Equivale a una columna vertical de agua de 9,8 metros de altura, es decir, que si cogemos un tubo, lo llenamos de agua y le damos la vuelta sumergiéndolo en un recipiente de agua, el agua del tubo no saldrá de este a menos que dicho tubo mida más de 9,8 metros (una altura aproximada de tres pisos). El experimento puede hacerse fácilmente con una manguera llena de agua y tapando el extremo superior. Evangelista Torricelli (1608-1647), discípulo de Galileo, ideó en 1644 el primer barómetro usando una columna de mercurio (Hg), cuya densidad es 13,6 veces la del agua, y observó que 760 mm de Hg equivalen al peso total del aire.

Temperatura

La temperatura es algo de lo que solemos tener una noción intuitiva, aunque a veces la confundamos con el calor. El termómetro convencional, tanto si es de mercurio como si es de alcohol, se basa en la capacidad de dilatarse que tienen esos líquidos cuando aumenta la temperatura. Por supuesto, cuando esta baja, el líquido se contrae. Para los valores de temperatura habituales (esto depende de dónde vivamos) se observa que la dilatación, en otras palabras, el aumento de longitud, es proporcional al aumento de temperatura. O sea, que si la temperatura aumenta en dos grados, el líquido, normalmente mercurio o alcohol, se estira el doble que cuando se aumenta un grado. Por eso, si miramos cualquier termómetro veremos que la distancia entre las marcas de los grados es siempre la misma, son equidistantes. Así que se puede calibrar un termómetro sin más que medir dos temperaturas y dividir a partes iguales la escala como si fuese una regla. La escala Celsius toma 0 grados y 100 grados para las temperaturas

de congelación y de ebullición del agua, algo que es bastante sencillo de identificar.

Uno de los grandes descubrimientos ha sido darse cuenta de que esa percepción puede cuantificarse y, más aún, es atribuible al estado de movimiento de los átomos en promedio. Si agitamos una cucharita enérgicamente en un vaso de agua con sal o azúcar veremos que ambos se disuelven más rápidamente que si no lo hacemos. También podemos acelerar el proceso de disolución si calentamos el agua: calentar y agitar tienen el mismo efecto. Siguiendo las ideas del conde de Rumford en 1797, el físico inglés James Prescott Joule en la década de 1840 demostró que la energía de la caída de un objeto de 50 kilos de peso desde una altura de 1 metro podía subir la temperatura de 100 mililitros de agua en 1,2 grados. La equivalencia entre el trabajo y el calor es proporcional; si el peso fuese el doble o la mitad, la temperatura subiría el doble o la mitad. Aunque es posible transformar todo el trabajo en calor, la transformación íntegra de calor en trabajo no es posible porque, como veremos, el calor implica un cierto desorden y por consiguiente una pérdida de eficacia. Los físicos cuantifican este desorden a través de la *entropía*, que corresponde al calor dividido por la temperatura. La mecánica cuántica impone limitaciones a la mínima entropía posible, o sea, al mayor orden posible. Veremos que la interpretación de la temperatura como medida del grado de movimiento también nos dice que no podemos tener una temperatura más baja que la que corresponde al reposo absoluto. Esta temperatura es el *cero absoluto*, y se corresponde con $-273,15^{\circ}\text{C}$. Por increíble que parezca, el reposo absoluto no puede conseguirse debido a la mecánica cuántica.

La presión del vapor

El fluido por excelencia, el agua, es uno de los que peor se entienden en física, a pesar de ser aquel en el que más a menudo pensamos instintivamente. Esto se debe a que el agua, comparada con otros líquidos, posee propiedades extraordinarias, que la

hacen única. Existen en la actualidad unas 72 anomalías sobre ella descritas y estudiadas. Una de las más notables es que cuando se enfría formando hielo aumenta de tamaño haciendo que los cubitos de hielo o los icebergs floten. Si tomamos agua muy fría del frigorífico y ponemos cubitos en ella veremos que la parte de los mismos que sobresale es un 10%. La punta del iceberg sugiere una mole de hielo bajo el agua que es nueve veces mayor y por eso es tan temido por los navegantes. Pero, al mismo tiempo, lo que significa es que si la comprimimos nunca se formará el hielo, o lo que es lo mismo, comprimiendo hielo lo licuamos. Por eso, el fondo de los océanos sometido a presiones brutales no se congela. Este mecanismo es el que utilizan los patinadores sobre hielo para deslizarse; con su peso concentrado en las delgadas cuchillas de sus patines, lo funden, haciéndolo resbaladizo.

El agua fluye, pero al contrario que los gases, tiene una tendencia a hacerlo sin desparramarse más de lo necesario, o sea que fluye junta y no separada. Esta tendencia se llama *cohesión* y explica por qué una gota sobre un cristal no se esparce de forma ilimitada y de hecho adquiere forma esférica, que es la manera más efectiva en que todas las moléculas de agua se arropan unas a otras, si bien las de la superficie solo lo son por las de dentro. Lo curioso es que las que están en la cima de la gota no resbalan por los lados, como esperaríamos, debido a la gravedad. Es por eso que cuando juntamos dos gotas, ambas se unirán para formar una gota mayor y disminuir la superficie total. Solo cuando la gota sea lo bastante grande empezará a deformarse hasta formar una mancha extensa precisamente porque la gravedad se torna importante.

No hay nada como una buena lluvia para limpiar el ambiente. Pero cuando el Sol sale, el agua que ha caído en forma de gotas formando los charcos termina evaporándose y el ambiente vuelve a secarse hasta la próxima precipitación. Las moléculas de agua, que normalmente están cohesionadas, reciben el impacto de las moléculas de oxígeno o nitrógeno que las empujan fuera del líquido y pasan a formar parte del vapor de agua que hay en la atmósfera. Si por el contrario metemos el agua en una botella a medio llenar, la cerramos y la ponemos al sol, veremos que

al cabo de un rato se forman gotitas de agua como las de rocío procedentes de la condensación del vapor. Pues bien, si destapamos la botella oiremos un pequeño chasquido que indica que sale un gas del interior; es el vapor de agua que es liberado y que, al empujar el tapón, ejerce presión. Por eso se llama *presión de vapor*, y nos sirve para saber si se va a producir condensación, avisándonos por tanto de que puede haber lluvia.

En la longitud, el tiempo y la masa, tenemos un amplio rango de valores recorriendo varios órdenes de magnitud, y lo mismo ocurre con la presión, la densidad y la temperatura, medibles respectivamente mediante un manómetro, un densímetro y un termómetro.

LA ECUACIÓN DE ESTADO

Como hemos dicho, podemos especificar la presión, la densidad y la temperatura. Para los gases es mejor usar el volumen en lugar de la densidad. Sin embargo, las tres cantidades no son independientes. Dadas dos de ellas, la otra está fijada. Esta relación se llama ecuación de estado y podemos a partir de ella establecer todos los estados físicos en los que puede encontrarse una cierta cantidad macroscópica de materia, siempre y cuando la superficie o los contornos del sistema no sean importantes.

Cuantización relativa de la masa

Una forma de determinar la ecuación de estado es experimentalmente, midiendo y haciendo una tabla de presiones, temperaturas y volúmenes (o densidades). En la segunda mitad del siglo XVII, la combinación de los experimentos de Boyle, Jacques Charles y Louis Joseph Gay-Lussac dio lugar a la *ley combinada de los gases*, donde para un gas determinado con una presión P , un volumen V y una temperatura T se tiene:

$$PV/T = \text{constante} \cdot M$$

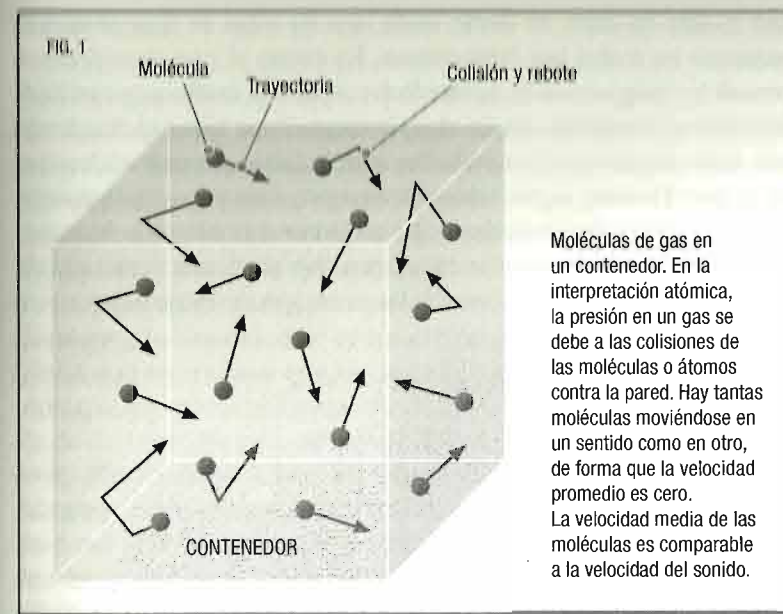
siendo M la masa y $T = 273 + t$, y siendo t la temperatura en grados Celsius. La constante depende de las unidades en que midamos P , V , T y M , pero es la misma para todos los gases que cumplen esa relación. Lo más interesante que se observa es que si se usan dos gases diferentes con masas diferentes pero con idénticas condiciones P , V , T , entonces la relación entre masas resulta ser una proporción de números enteros n , $M_1/M_2 = n_1/n_2$. Por ejemplo, 1 g de helio ocupa 5,6 litros a 1 atm y 25 °C. Pues bien, si metemos neón en un recipiente con una capacidad de 5,6 litros a 1 atm y 25 °C, nos cabe cinco veces más, es decir, 5 g. El gas más ligero es el hidrógeno atómico, donde 1 g ocupa 22,4 litros, de forma que lo que se tiene es la cuantización de la masa de cualquier gas en idénticas condiciones,

$$M = A M(H),$$

donde $A = 1, 2, 3, 4, 5...$ es el número másico. Por ejemplo $M(\text{He}) = 4 M(H)$, $M(\text{Ne}) = 20 M(H)$. Por supuesto, podemos poner cada vez menos cantidad de hidrógeno, con lo que tendremos menos helio o neón, pero la relación de masas será igual.

Energía cinética y temperatura

La otra posibilidad para determinar la ecuación de estado sería usando nuestras ideas teóricas acerca de la materia de la que está compuesto el gas, pero las complicaciones pueden ser enormes. Hay un caso especialmente simple donde la ecuación de estado puede establecerse directamente por medios teóricos. Se corresponde con el llamado *gas ideal*, y se caracteriza porque las moléculas del recipiente no chocan entre sí, aunque sí lo hacen con las paredes del recipiente que las contiene (figura 1). Lo que pretendemos explicar fue una genial idea de los hermanos Bernoulli en 1777, una familia de científicos que realizó multitud de descubrimientos sobre leyes físicas cuya utilidad sigue vigente hoy en día. Es algo realmente asombroso, porque demuestra



que las leyes de Boyle, Charles y Gay-Lussac combinadas son consecuencia de las leyes de la mecánica clásica de Newton aplicadas a las partículas del gas, y suponiendo que son muchísimas, por lo que podemos esperar usar ideas de tipo estadístico.

La idea es muy sencilla. Si admitimos la existencia de átomos podemos pensar que la presión se debe a un flujo de moléculas que rebotan contra la pared del recipiente, del mismo modo que el chorro de agua de una manguera a presión se usa para desplazar objetos y realizar una limpieza a fondo. Podemos visualizar el flujo de partículas imaginando una autopista llena de vehículos en hora punta vista desde un helicóptero. Apenas distinguimos los coches, pero percibimos un comportamiento de fluido ligeramente granulado. Al rebotar este flujo contra la pared, cada partícula ejerce individualmente una fuerza, y en conjunto ejercen una presión en la dirección perpendicular a la pared. Ahora bien, si el gas está globalmente en reposo, esperamos que la mitad de las partículas se muevan en una dirección y la otra mitad en la opuesta. A diferencia de los coches en la autopista, su veloci-

dad media es cero, es decir, cada una de ellas se mueve erráticamente en todas las direcciones. Es como si nos moviéramos con el helicóptero a la velocidad media del tráfico, permitiéndonos verlos pululando sin desplazarse. Pues bien, el resultado que obtuvieron los Bernoulli fue que, a pesar de que no hay un movimiento neto, sigue habiendo una presión, y que ciertamente la temperatura está relacionada con la energía cinética de movimiento de las N moléculas en el gas, que para una molécula de masa m y velocidad v es $mv^2/2$. La ecuación de Bernoulli es

$$\text{Promedio de } mv^2/2 = 3 k_B T/2,$$

donde k_B podría haberse llamado constante de Bernoulli, pero los físicos la llaman la *constante de Boltzmann*, quien popularizó el cálculo e hizo muchas más cosas. El promedio tiene en cuenta que no todas las moléculas llevan exactamente la misma velocidad. Por tanto, no hay un viento neto del gas, sino un sinnúmero de movimientos moleculares y aleatorios que causan la presión contra las paredes del recipiente al golpear únicamente por un lado. Si ponemos un objeto o a nosotros mismos en el interior del contenedor, los contornos actúan de paredes, experimentando la presión. Recordemos que $T = 273 + t$, siendo t la temperatura en grados Celsius. Esto llevó a introducir una nueva escala de temperatura absoluta para T , cuya unidad es el kelvin (K). Como la energía cinética es positiva, entonces T es positiva, lo que implica que $t > -273$ °C. Por tanto hay una temperatura mínima, que se corresponde a $T = 0$ K, el cero absoluto, y que a su vez se corresponde con el máximo reposo posible. La combinación $k_B T$ representa la energía equivalente a una cierta temperatura absoluta. Si medimos la energía en electronvoltios (eV), numéricamente se encuentra que

$$k_B = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}.$$

A veces suele representarse la combinación $k_B T$.

El sonido

Para un gas como el aire o un líquido como el agua, podemos aprovechar estos movimientos moleculares para transmitir impulsos mediante sus colisiones sucesivas, de igual modo que una canica puede transmitir su movimiento a una sucesión de canicas en reposo. La velocidad de transmisión del impulso es la velocidad de la canica incidente. Si las otras se están moviendo en direcciones diferentes, la transferencia de movimiento es menos eficiente y la velocidad de propagación del impulso es menor, de forma que esperamos que los impulsos no se transmitan más rápido que las velocidades típicas de movimiento de las moléculas. Es decir, tenemos una velocidad límite.

A nivel macroscópico, los impulsos moleculares generan ondas de presión y densidad haciendo vibrar la pared del contenedor, o el parche de un tambor, y se corresponden con el sonido. Por tanto, las moléculas del aire se mueven más rápido que el sonido, cuya velocidad es de unos 340 m/s. El sonido es un viento «virtual» que solo existe entre molécula y molécula.

Cuantización absoluta de las masas

Pero además, la ecuación de Bernoulli nos dice que si tenemos dos gases a igual presión, volumen y temperatura, el número de moléculas es el mismo. Por otro lado, como la masa total es $M = Nm$ podemos saber la relación de peso de una molécula a la otra sin más que pesar ambos gases. Hay por supuesto otras posibilidades, pero lo realmente interesante, casi mágico, es que analizando propiedades macroscópicas como presión, volumen y temperatura podemos obtener información de las masas de los átomos y las moléculas. Podemos usar la más ligera como referencia, y que además resulta ser la más simple: el hidrógeno. Y aquí viene la «magia»: lo que se observa es que básicamente todas las sustancias conocidas tienen un peso que es un múltiplo entero del peso del hidrógeno, $M(A) = AM(H)$, pero como $M(H) = N m_H$ y $M(A) = N m_A$ entonces

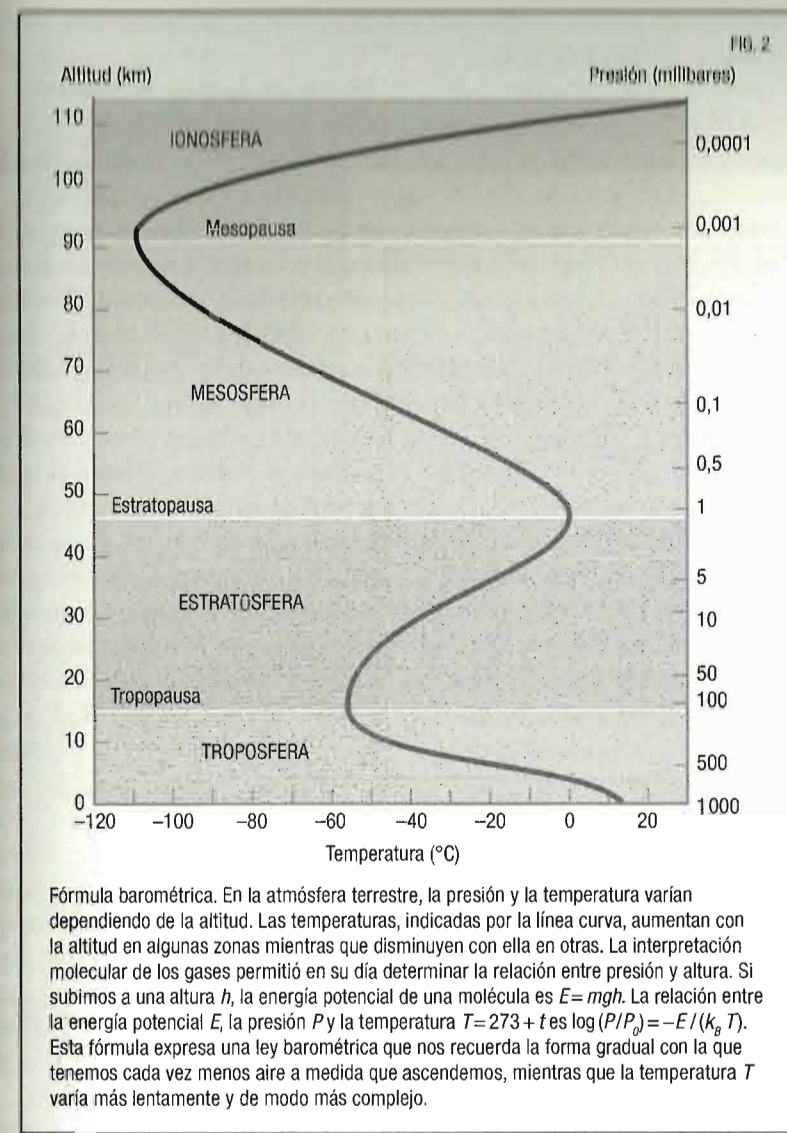
$$m_A = A m_H$$

y las masas de los átomos son múltiplos enteros de la masa del átomo de hidrógeno. Una de las grandes aportaciones de Amedeo Avogadro (1776-1856), que dio realmente en la diana, fue establecer en 1811 la distinción entre átomos y moléculas. Para él, la molécula es el objeto que se mueve como un todo en el gas. Puede estar formada por uno o muchos átomos, pero lo que importa es el ente que golpea como un todo las paredes del recipiente que lo contiene. El *número de Avogadro* es el número de átomos que hay en 1 g de hidrógeno, pero su determinación tuvo que aguardar más de un siglo dado que hay que saber cómo contar átomos. El número de Avogadro de una sustancia es un *mol*.

Para los gases, lo que sabemos es que 18 gramos de aire ocupan un volumen de 22,4 litros a presión atmosférica y temperatura ambiente de 25 °C. El mismo volumen de helio pesa 4 gramos, mientras que el neón pesa 20 g, o sea, cinco veces más que el helio. ¿Qué conclusión obtenemos? Que la masa del átomo de neón es cinco veces mayor que la del helio. Existen pequeñísimas desviaciones a estas relaciones de números enteros, y tienen que ver, por increíble que parezca, con la teoría de la relatividad de Einstein.

La fórmula barométrica

En los albores de la Revolución francesa, tres expedicionarios montaron su tienda de campaña en la cima del Mont Blanc, a 4810 m de altitud, el techo de Europa, para tomar medidas de presión y temperatura. Uno de los experimentos que en 1787 hizo Horace-Bénédict de Saussure, padre del alpinismo moderno, fue comprobar que el agua hervía a menos de 100 °C, concretamente a 80 °C. Lo que los alpinistas encontraron fue que, de hecho, la presión atmosférica disminuye con la altura (figura 2), y por eso la sopa en alta montaña no estará nunca tan caliente como a la orilla del mar. Si en lugar de presentar una disminución gradual, la densidad del aire fuese uniforme,



como en los líquidos, la atmósfera acabaría súbitamente a unos 10 km, 1 km por encima del monte Everest. Sin embargo, debido a la agitación térmica, las moléculas del gas tienden a subir,

VISUALIZACIÓN DEL GAS IDEAL Y EL REAL

Imaginemos un campo de fútbol de aproximadamente 100x80 m. Si están distribuidos uniformemente por el campo, los 22 jugadores (o 20 para dejarlo en números redondos) ocupan cada uno un cuadrado de unos 20 m de lado, de manera que la distancia media a la que se encuentra cada uno con respecto al más cercano es también de unos 20 m.

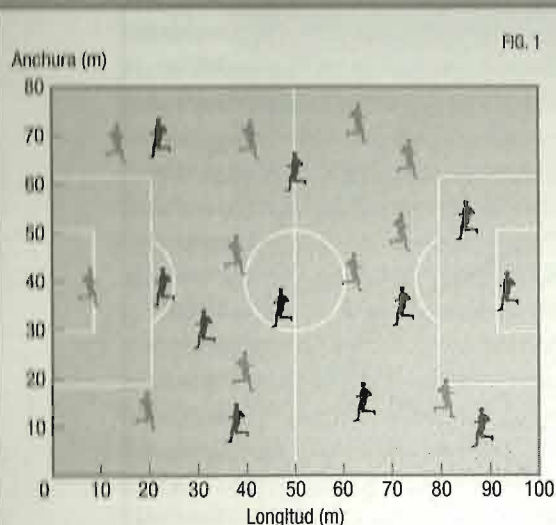


FIG. 1

Si ahora se mueven aleatoriamente, tal y como lo hacen las moléculas de un gas, en algunos casos la distancia será mayor y en otros será menor, pero en promedio la distancia más cercana será de unos 20 m (esto se representa en la figura 1). Si tomamos medio metro para el tamaño del jugador en la superficie del campo, vemos que la distancia a la que se encuentran es realmente tan grande que la probabilidad de que choquen al azar es baja. Cuando acaba el partido y algunos de los espectadores comienzan a invadir el campo (como se muestra en la figura 2) hasta sumar un millar, la situación es bien distinta. En este caso, la distancia media entre personas se vuelve tan corta que el movimiento de estas se limita enormemente, y la probabilidad de choque fortuito es entonces alta.

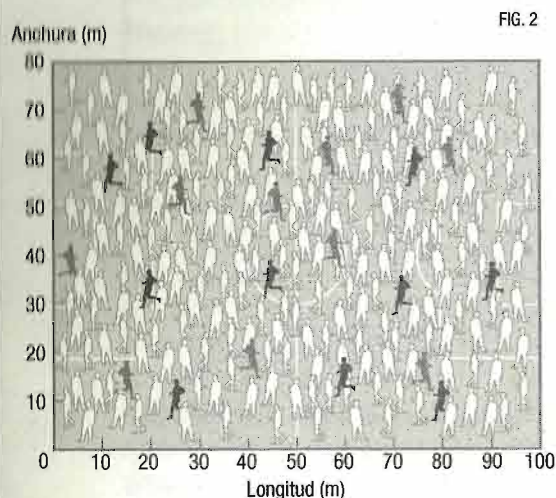


FIG. 2

aunque finalmente la gravedad terrestre les impide escapar al espacio.

Gases reales

Como su nombre sugiere, el gas ideal no existe como tal, pero muchos gases se le parecen sobremedida, sobre todo cuando su densidad es suficientemente baja. El aire que respiramos contiene nitrógeno y oxígeno moleculares, y en las condiciones normales de presión y temperatura sus moléculas se encuentran a una distancia típica de 30 veces su tamaño. Pero si lo comprimimos, disminuye la distancia entre moléculas y aumentan las probabilidades de colisiones entre ellas.

Los físicos se disputan el mérito por encontrar ecuaciones de estado, que como hemos apuntado no son otra cosa que la relación entre presión, volumen y temperatura del sistema. Una de las enormes ventajas es que permiten hacer muchas predicciones sin que sepamos los detalles acerca de la estructura del sistema físico. Esto puede parecer una precaución innecesaria; se sabe que la materia está formada por átomos. Pero si la sometemos a condiciones extremas no sabemos de antemano qué puede pasar. De hecho, los átomos pueden descomponerse, disgregándose sus núcleos en protones y neutrones. Además, estos pueden a su vez descomponerse en sus partículas constituyentes. El nivel de complejidad crece de forma alarmante, pero el hecho básico de que la relación P, V, T , determina el estado del sistema no solo no se discute sino que es utilizada tal cual en el análisis del *plasma de quarks y gluones*, con el mismo espíritu con que lo hicieron los Bernoulli hace trescientos cincuenta años.

La determinación teórica de la ecuación de estado es la que nos da confianza sobre si la imagen física que nos hemos formado sobre la estructura de la materia es atinada. Los cálculos complejos que se realizan con superordenadores en la actualidad llegan a utilizar 10^{12} moléculas, resolviéndose las ecuaciones de Newton de todas ellas, bajo determinadas circunstancias.

ESTADOS CLÁSICOS DE LA MATERIA

Los estados extremos de la materia se entienden mucho mejor si se analizan primero los estados clásicos, y extremadamente normales, de la materia. Todos los estados están emparentados, o sea, podemos cambiar de uno a otro sin más que cambiar las condiciones de presión, densidad y temperatura. Se enseña en la escuela que los estados de la materia son sólido, líquido y gaseoso, y los visualizamos como porciones de materia que tienen una forma permanente, se adaptan a un recipiente sin cambiar de volumen o se expanden de forma ilimitada, respectivamente. La razón última de cuál es la forma de agregación depende del balance entre el estado de movimiento y las fuerzas que hay entre los átomos y las moléculas. A estos hay que añadir el plasma, el llamado *cuarto estado de la materia*, que corresponde a átomos ionizados, y que se produce en la llama de un fósforo, en el interior de los tubos fluorescentes, en la ionosfera terrestre o en el Sol. El estado más sencillo de entender es el estado gaseoso y afortunadamente existen muchas sustancias que en las condiciones de habitabilidad humana se presentan en forma gaseosa de manera natural. Eso facilitó el trabajo a los primeros investigadores, que pudieron establecer leyes sencillas sobre el comportamiento de los gases, como ya hemos visto.

El estado sólido viene caracterizado usualmente por estructuras geométricas ordenadas en forma de cristales con formas repetitivas. La razón de la simetría es que requiere la menor energía posible en el proceso de formación a partir del estado líquido, que suele ser suficientemente lento. Los sólidos amorfos, como el vidrio, no tienen estructura geométrica definida y suelen serlo porque en algún momento fueron líquidos que se enfriaron de forma muy rápida.

El agua, como líquido más familiar, presenta estos tres estados en forma de hielo, agua líquida o vapor de agua. Su fórmula química, H_2O , pone de manifiesto que cada molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Esta composición en términos de proporciones relativas hace que a pesar de agregarse de distintas formas pensemos que se

ECUACIÓN DE ESTADO DE VAN DER WAALS

En 1873, el físico neerlandés Johannes Diderik van der Waals presentó su tesis doctoral «Sobre la continuidad de los estados líquido y gaseoso». Habiendo encontrado su propia ecuación de estado, algo que le proporcionó el premio Nobel en 1911, fue capaz de predecir la licuefacción de gases de forma teórica y confirmarla experimentalmente. Para su ecuación, tuvo en cuenta el tamaño no nulo de las moléculas de gas. Aunque a una presión lo bastante baja las moléculas de los gases reales puedan moverse sin que la proximidad entre ellas entorpezca sus movimientos, cuando la presión aumenta las distancias entre moléculas disminuyen cada vez más (véase la figura), dado que estas ocupan espacio, a diferencia de las del gas ideal. En consecuencia, el volumen ocupado por las moléculas de gas con respecto al volumen interior total del contenedor cobra una importancia creciente. El volumen ocupado por el gas es mayor que el que debería ocupar según la ley de los gases ideales.

Universalidad entre los gases

En su deducción admitió la imagen atómica de la materia así como el tamaño de los átomos y las interacciones entre átomos neutros. A partir de ella, se estableció la existencia de puntos críticos, es decir, valores de P , V , T , en torno a los cuales la diferencia entre la fase líquida y la gaseosa no es obvia. Igualmente encontró una universalidad entre todos los gases, denominada *ley de los estados correspondientes*, que básicamente los reduce a un único gas tipo, y como demostró Guggenheim en 1948, esto es particularmente cierto cerca del punto crítico. El análisis de los datos de temperatura y densidad sugirió revisar el concepto de *transición de fase* en torno al punto crítico y desembocó en el grupo de renormalización de Wilson y la moderna teoría de fenómenos críticos. Van der Waals postuló además las fuerzas de su nombre que medio siglo después encontrarían justificación mediante la mecánica cuántica, y que explican la cohesión de materiales sólidos, así como las interacciones entre líquidos, gases y coloides.

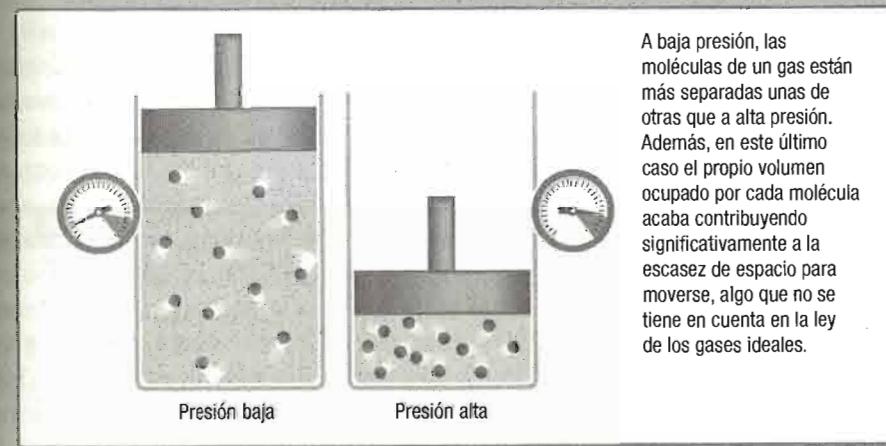
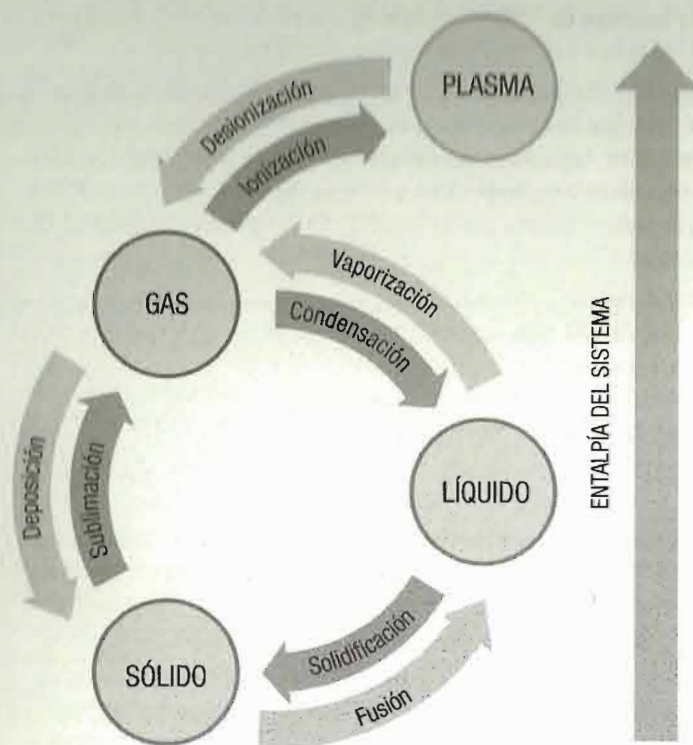
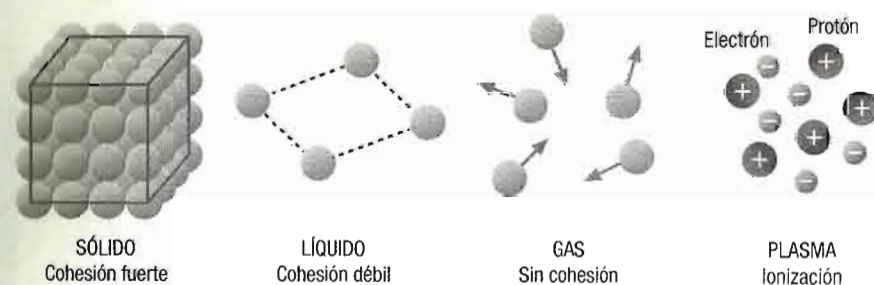


FIG. 3



Entalpía y cambios de estado.

FIG. 4



Estados de la materia y sus respectivas clases de enlaces.

trata de agua en distintos estados (sólido por debajo de 0 °C, gaseoso por encima de 100 °C y líquido entre 0 y 100 °C, siempre y cuando la presión sea la atmosférica a nivel del mar).

La descripción tradicional de los estados sólido, líquido y gaseoso considera las distintas formas de agregación de la materia, pero pasa por alto cuál es la naturaleza de las fuerzas que subyacen en la atracción y cohesión moleculares. Los gases que se asemejan al gas ideal están formados por partículas neutras que pueden ser átomos o moléculas. El gas de hidrógeno, por ejemplo, está mayoritariamente en estado molecular, consistente en la unión de dos átomos de hidrógeno.

En cambio, el helio se encuentra en un estado atómico dado que la molécula, aunque existe, es tremendamente inestable.

La mejor forma de ordenar los estados de la materia es mediante su *entalpía*. Esto no es más que la cantidad de calor que necesitamos para llevar el sistema de la fase de sólido a la de plasma de una forma reversible, es decir, que lo hagamos de forma que si dejamos de suministrar calor entonces volvamos a la situación original. En la figura 3 mostramos la entalpía y en la 4 los estados de la materia.

En el estado de plasma, podemos seguir utilizando la fórmula química mientras los núcleos atómicos sigan manteniendo su identidad. Más allá del estado de plasma, la materia es inidentificable y los elementos primigenios no dejan rastro de su composición química inicial. Es por eso que los estados carentes de denominación de origen químico suelen tildarse de *exóticos*. Por ejemplo, si partimos de agua, cada molécula en estado de total ionización genera 10 electrones, 2 protones y 1 núcleo de oxígeno. Cuando se produzca la recombinación al bajar la temperatura podremos tener hidrógeno, oxígeno y agua en proporciones 2H_2 , O_2 y $2\text{H}_2\text{O}$, y no solamente agua, de manera que este es un proceso irreversible.

Ya sabemos las leyes que rigen el comportamiento de la materia en todas las condiciones excepto en las más extremas.

STEPHEN HAWKING

Tamaños extremos

El tamaño importa. Podemos imaginar un mundo exactamente igual al nuestro, con personas, animales o cosas a una escala mucho mayor o mucho menor, pero sencillamente no es viable. Los átomos tienen un tamaño fijo y un mundo a escala más grande o más pequeña tiene más o menos átomos y no el mismo número de átomos más grandes o más pequeños. Por eso, el tamaño no es una cuestión relativa sino también absoluta.

El sabio griego Demócrito fue el primero que vaticinó la existencia de los átomos. Los atomistas sostenían que el ser era lo lleno y el no ser el vacío. Por eso pensaban que si partíamos un átomo de forma indefinida llegaría un momento en el que se obtuviese la nada. Los átomos, según ellos, no difieren entre sí por naturaleza sino solo por su forma y magnitud. Llegaron a formular reglas de combinación como unión y disgregación, que son la base de las reacciones químicas, inspirados por una imagen de átomos con ganchos y hembrillas que encajaban. Los primeros experimentos que hicieron sospechar que la materia estaba formada por átomos surgieron por puras necesidades prácticas. Un caso muy llamativo es el del pan de oro, un elemento decorativo de imágenes y cuadros que podemos admirar con mucha frecuencia en iglesias del Barroco. En realidad su origen data de tiempos anteriores al antiguo Egipto. El oro, además de ser un metal precioso y por tanto muy caro, es un metal muy maleable, es decir, que tiene una gran facilidad para adoptar una determinada forma. Por ese motivo, puede extenderse formando una fina película y utilizarse para envolver y dar así la impresión de que toda la pieza es de oro. Si bien no es oro todo lo que reluce, en este caso sí que podemos

decir que solo vemos oro. Pero como las apariencias engañan, cuanto más podamos extender el oro, más parecerá que la obra es de oro macizo. Los artistas trataron de extenderlo hasta el mayor extremo imaginable, y con gran decepción comprobaron que había un límite: el pan de oro tiene un grosor mínimo. El más fino

que se consigue sin romperse tiene unos 500 átomos de grosor.

El genial Benjamin Franklin también trató de establecer la naturaleza atómica de la materia en una de sus visitas al continente europeo, en 1773, cuando Estados Unidos aún era una colonia del incipiente Imperio británico. Franklin observó que el aceite contenido en una cucharita de té se extendió varios metros cuadrados en un pequeño estanque de Londres. Hoy en día este tipo de experi-

mentos serían probablemente objeto de una multa impuesta por un *bobby* londinense, pero en aquella época el cuerpo de policía no existía, lo que le permitió iniciar de paso y de forma involuntaria la *nanociencia*. Más tarde, lord Rayleigh repitió el experimento hacia finales del siglo XIX, y logró calcular el número de moléculas de forma que difiere del actual en un factor 2.

Nadie ha observado directamente el movimiento al azar de las moléculas o los átomos. Sin embargo, en 1827, Robert Brown, un botánico inglés, realizó una observación especialmente llamativa al microscopio: el rápido y errático movimiento de pequeñas partículas de polen en un medio acuoso. Fue la primera constatación de que las moléculas de agua empujaban a los granos de polen cada vez que se topaban con ellos y una de las principales evidencias de la estructura atómica de la materia. Einstein en 1905 abordó el asunto desde un punto de vista matemático y propuso determinar el número de Avogadro contando colisiones y teniendo en cuenta que el medio acuoso está a una cierta temperatura. En 1911, Jean Perrin realizó las medidas, cien años después de que Avogadro formulara su hipótesis premonitoria,

Si por algún cataclismo, todo el conocimiento de la humanidad quedara destruido y tuviera que elegir una única frase para las generaciones futuras que poseyera la mayor cantidad de información posible, elegiría la hipótesis atómica.

RICHARD FEYNMAN

DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE AVOGADRO

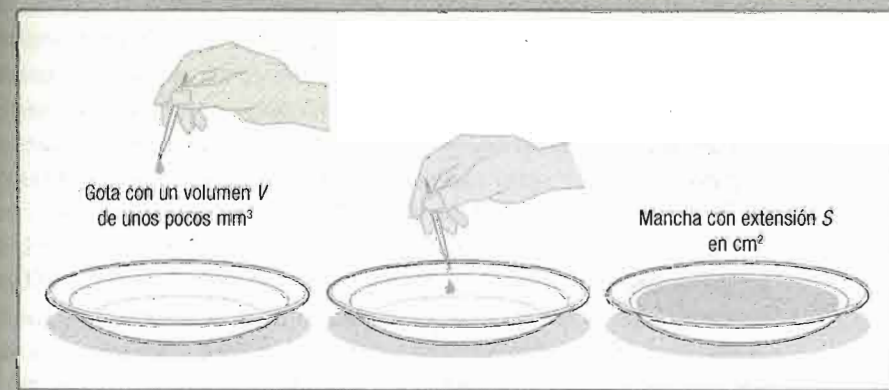
La idea subyacente en el número de Avogadro se ilustra muy bien con una piscina de bolas. Si la materia está formada por átomos cohesionados, lo máximo que puede extenderse un pedazo de materia es exactamente hasta que se convierta en una lámina con el grosor de un átomo. Si conocemos el volumen inicial, que no cambia, y la superficie, podemos saber el grosor de los átomos. Lo bueno de este razonamiento es que nos permite además calcular el número de átomos, así como su tamaño que es de $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$. Este experimento, que confirma de forma concluyente la cuantización de la materia, podría haber sido realizado dos mil años antes por Demócrito y su escuela, pero sencillamente no se les ocurrió.

Contando moléculas

Para determinar el número de moléculas utilizaremos aceite de oliva, que en un 75 % es ácido oleico, $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$. Este experimento de sobremesa, mostrado en la figura, puede realizarse cogiendo con un palillo de dientes una gota de aceite de la aceitera. La gota que se extraiga debe tener un volumen V de unos pocos milímetros cúbicos. La depositamos sobre un plato hondo lleno de agua. Para estimar la extensión S en centímetros cuadrados hemos de mirar la mancha de aceite al trasluz, y veremos que ocupa casi todo el plato. El grosor L será como mínimo el tamaño de la molécula de aceite. El volumen (V) de una molécula será $L \cdot L \cdot L = L^3$. Entonces, si N es el número de moléculas:

$$V = S \cdot L \rightarrow L = V/S; \quad V = N \cdot L^3 \rightarrow N = V/L^3.$$

Por ejemplo, si $V = 1 \text{ mm}^3$ y $S = 10 \cdot 10 \text{ cm}^2$, entonces $L = 10^{-4} \text{ mm} = 0,1 \text{ μm}$ y $N = 10^{12}$. El número N , aun siendo muy grande, es mucho menor que el número de Avogadro, debido a impurezas en el agua y a que las moléculas de aceite son una cadena lineal o una bola y además son hidrófobas, es decir, se ponen de pie sobre el agua, por así decirlo.



obteniendo un número ya muy cercano al actual. Esto dio pie a definir 1 mol como el número de átomos que hay en un gramo de hidrógeno, que es $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$.

LA CUANTIZACIÓN DE LA CARGA

La materia está cuantizada, pero ¿qué es lo que causa que los átomos estén unidos formando sólidos o líquidos? Van der Waals demostró que las moléculas en los gases se atraen hasta el punto de que si bajamos la temperatura entonces forman un líquido. Esto significa que si los átomos o las moléculas siguen siendo los mismos entes deberían atraerse en ambas circunstancias.

Incluso si cortamos mantequilla nos cuesta energía, pero ¿dónde están los ganchos y las hembrillas de Demócrito? Los átomos existen, como anticipó este, pero al contrario de lo que él y muchos otros tras él pensaban, no son indivisibles. Las primeras dudas surgieron a partir de los experimentos de Michael Faraday (1791-1867) sobre la electrólisis en 1834, cuya importancia fue reconocida cincuenta años más tarde por Hermann von Helmholtz (1821-1894), sugiriendo la cuantización de la carga. La confirmación final llegó cuando Joseph John Thomson (1856-1940) averiguó en 1897 que los rayos catódicos tienen naturaleza corpuscular y descubrió el electrón como carga elemental. La carga, al igual que la materia, ¡está cuantizada! Hay una mínima cantidad de carga, el electrón. ¿De dónde salen los misteriosos electrones? ¡De los átomos! La relación entre la *carga equivalente* (1 mol de electrones) y la del electrón se obtiene a través del número de Avogadro

$$Q = eN_A$$

lo que da una carga para el electrón de $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ culombios. Los electrones son los corpúsculos de la radiación catódica, y como partículas cargadas que son, se aceleran en presencia de un campo eléctrico, y «caen» desde el cátodo hacia el ánodo, del mismo modo que una piedra cae al suelo por acción de

la gravedad, de arriba hacia abajo. La energía potencial que tiene un electrón cuando le aplicamos una diferencia de potencial de 1 voltio se llama *electronvoltio* (eV) y es una unidad de energía que usaremos con mucha frecuencia en este libro.

Estos hallazgos permitieron a Thomson esbozar su teoría electrónica de la materia y sus consecuencias en la conductividad eléctrica de los gases, a saber, que los electrones son los principales portadores de la electricidad. También le permitió estudiar la atenuación de la luz a su paso por un gas y se las ingenió para relacionar el número de electrones por centímetro cúbico con la atenuación de la luz.

EL TAMAÑO DEL NÚCLEO

Una vez que se estableció que los indivisibles átomos eran divisibles, la prioridad consistió en desentrañar su estructura. Los experimentos acerca de la estructura de la materia daban estimaciones en conjunto, es decir, con precisión relativa y no absoluta, pero nunca permitían contar los átomos uno a uno. El imprevisto descubrimiento de la *radiactividad* dio un giro inesperado a la situación. En 1895, Wilhelm Conrad Röntgen descubrió los rayos X. Unos meses más tarde, Antoine-Henri Becquerel observó que las sales de uranio emitían una radiación invisible capaz de ennegrecer (velar, como por la exposición a una luz intensa) una placa fotográfica recubierta por papel negro, el cual la aislaba de la luz visible. También constató que dichas sales podían descargar un electroscopio. Marie Curie (1867-1934) y Pierre Curie (1859-1906) encontraron nuevas sustancias radiactivas, el polonio y el radio. La mayoría de estas investigaciones y mediciones experimentales a finales del siglo XIX y comienzos del XX se basaban tanto en el oscurecimiento de placas fotográficas para visualizar la radiación como en métodos de ionización para cuantificar su intensidad en términos de la corriente generada.

Muchos me preguntan para qué sirve la electricidad y yo les respondo: «¿Para qué sirve un recién nacido?».

MICHAEL FARADAY

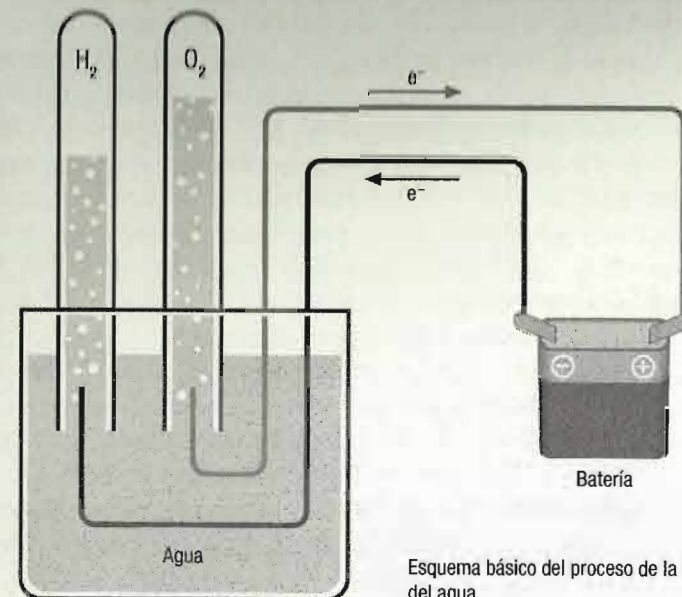
ELECTRÓLISIS Y RAYOS CATÓDICOS: DOS CARAS DE LA MISMA MONEDA

La electrólisis del agua (figura 1) consiste en su separación en hidrógeno y oxígeno aplicando una diferencia de potencial generada por una pila. La cantidad de cada gas extraída del líquido depende de la corriente eléctrica. Faraday observó que la velocidad a la que se producían ambos gases era constante y proporcional a la corriente que pasaba entre los electrodos. Su observación fue crucial para el desarrollo posterior de la teoría atómica de la materia. Resulta además que el volumen de hidrógeno es el doble del volumen de oxígeno, lo que fundamenta la conocida fórmula del agua, H_2O . Las leyes de Faraday establecen que la masa de soluto es proporcional a la carga: básicamente, que si pasa una carga de 9600 culombios, se disocian 18 g de agua, produciendo 2 g de hidrógeno y 16 g de oxígeno. Esto sugería que, si la materia está cuantizada en átomos, la carga que se genera está también cuantizada, es decir, que siempre es un múltiplo entero de una carga elemental. Fue más tarde cuando Joseph John Thomson, analizando la electrólisis de los gases en tubos de descarga, donde un filamento de tungsteno se calentaba y se aplicaba un campo eléctrico, vio que unos misteriosos rayos atravesaban el tubo procedentes del cátodo. Thomson comprobó que esos rayos catódicos (figura 2) se curvaban bajo la acción de campos magnéticos y encontró que tienen una relación entre carga y masa numéricamente idéntica a la que encontró Faraday en sus experimentos.



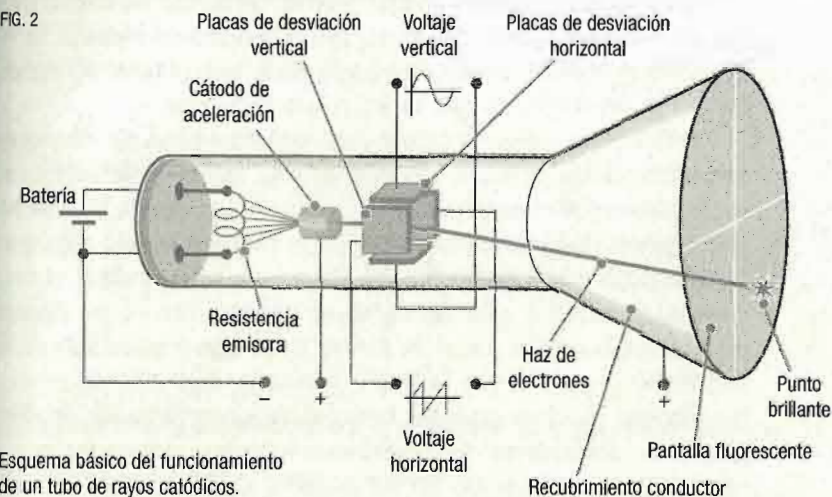
Dos pioneros del electromagnetismo. A la izquierda, Michael Faraday en un retrato del grabador y dibujante inglés Charles Turner. Faraday fue el descubridor de la inducción electromagnética, el diamagnetismo y la electrólisis. Joseph John Thomson (derecha) descubrió el electrón, los isótopos y es el inventor del espectrómetro de masas.

FIG. 1



Esquema básico del proceso de la electrólisis del agua.

FIG. 2



Esquema básico del funcionamiento de un tubo de rayos catódicos.

Pero en 1903 William Crookes descubrió algo totalmente inusitado. Mientras se entretenía observando la fluorescencia producida por la *radiación alfa* procedente de sales de radio en una pantalla de sulfuro de cinc (ZnS), estas se le derramaron. Como eran costosas de conseguir, se afanó en recogerlas y para ello usó un microscopio en la oscuridad. En lugar de ver una fulguración uniforme como esperaba, se encontró con destellos discretos y localizados, y dedujo que cada uno de ellos era producido por una única partícula alfa. Impresionado por este descubrimiento, construyó un dispositivo capaz de medir tales destellos y lo llamó *espintariscopio* (visor de centelleo en griego), que fue el precursor de los modernos detectores de centelleo. Colocando una aguja con radio a distancias variables observó el mar turbulento de centelleos que se generaba cuando se acercaba la aguja al dispositivo. Era la primera vez que podía constatare de forma visible la acción individual de una partícula alfa. Una partícula, un destello. Así que podía contarse cuántas partículas se emitían en una cierta dirección, de una en una. Este descubrimiento puede considerarse como la cuantización absoluta de la materia. Hasta la fecha, todas las evidencias habían sido cuantizaciones relativas.

Para una fuente radiactiva que emite de forma isótropa, es decir, por igual en todas las direcciones, podemos reducir la tasa de cuentas colocándonos más lejos, dado que el tamaño del ocular del microscopio ocupa una superficie menor.

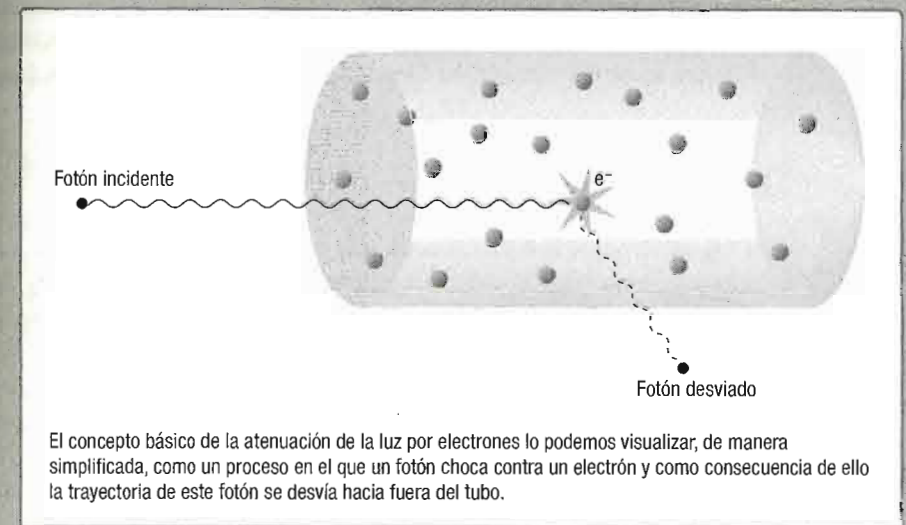
Cuando Rutherford realizó sus experimentos de dispersión por partículas alfa sobre láminas de oro, utilizó precisamente el espintariscopio como detector. Un estudiante novel, Ernest Marsden, se estrenó como investigador en 1909 midiendo algo que el mismo Rutherford había creído altamente improbable: el retroceso de partículas alfa. En palabras suyas: «Era como disparar un cañonazo contra papel de fumar y ver que el obús rebotaba». Rutherford calculó que la única forma de que esto fuese posible era que hubiera grandes concentraciones de masa en zonas pequeñas. De este modo descubrió el núcleo atómico, y realizó una primera estimación de su tamaño, calculándolo en varios femtómetros ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), o sea, entre 10 y 100 000 veces más pequeño que el átomo.

ATENUACIÓN DE LA LUZ POR ELECTRONES

El método seguido por Joseph John Thomson para estudiar la atenuación de la luz por electrones y lograr, entre otras cosas, relacionar dicha atenuación con el número de electrones por centímetro cúbico, se basa en el siguiente razonamiento. Una onda electromagnética es una oscilación en sentido transversal de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí. Por tanto, una partícula cargada estará sometida a una aceleración transversal. Una carga acelerada radia ondas electromagnéticas. Las antenas de televisión, radio o telefonía son un buen ejemplo de ello; por ellas suben y bajan electrones procedentes de la corriente alterna y de ellos emanan las ondas que surcan el espacio interconectando nuestra sociedad de las telecomunicaciones. Ahora bien, la intensidad de la radiación depende del cuadrado de la aceleración, y como los electrones son las partículas más ligeras en los átomos (son 2 000 veces más ligeros que un protón), ellos están sometidos a aceleraciones más violentas que los iones, de forma que son los más importantes radiadores. En resumen, llegan ondas a los electrones del gas que oscilan de forma acelerada y emiten ondas a su vez en todas las direcciones, con lo cual la intensidad de la luz hacia delante se atenúa de forma paulatina.

Opacidad ante la luz

En la teoría cuántica podemos visualizar el proceso como un fotón que se desvía de su trayectoria debido al tamaño del electrón, como se muestra en la figura. Cuanto mayor sea la cantidad de electrones, mayor será la atenuación, y al final cualquier trozo de materia suficientemente grueso será opaco al paso de la luz. Dicho de otro modo, los electrones que hay en la materia tapan la luz, siendo una fuente de opacidad.



Desde su hallazgo, los rayos X despertaron un vivo interés en los físicos. Charles Barkla (1877-1944) descubrió que todos los gases sujetos a la radiación de los rayos X emitían a su vez rayos X cuya intensidad aumentaba si el gas estaba compuesto de átomos pesados. Además vio que los rayos X se atenuaban a su paso por el aire, a razón del 0,024% por cada centímetro de espesor. Joseph John Thomson explicó el suceso suponiendo que la atenuación se debía a los electrones que había en el gas y dedujo que el número de electrones, que llamaremos Z , no era muy diferente del peso atómico. En realidad, ahora sabemos que son exactamente iguales.

Por otro lado, el tamaño finito del núcleo sugería que no era elemental, y que podía estar formado a su vez por otras partículas. Si la carga total del átomo debía ser cero, esto significaba que debía haber tantos protones como electrones. Pero los átomos en general son más pesados que eso; de hecho, los elementos ligeros pesan el doble, es decir $A \sim 2Z$. ¿De dónde venía la diferencia $N = A - Z$? Los experimentos de Barkla sugerían que la masa del núcleo, excepto en el caso del hidrógeno, era mayor que la masa del protón multiplicada por el número de electrones. Se asumía que el exceso de masa era debido a la existencia de partículas neutras con el mismo peso que el protón. El descubrimiento en 1932 del neutrón por James Chadwick confirmó esta suposición.

El tamaño del protón

Al contrario que los electrones, los fotones o los neutrinos, los protones y neutrones tienen un tamaño pequeño pero finito. En el caso especial del protón esto puede determinarse estudiando su interacción con electrones y viendo cómo estos se dispersan por efecto del protón. La *ley de Coulomb* determina la órbita que seguirá el electrón cuando pasa cerca del protón, y es la misma que tendría un cometa que pasa una única vez cerca del Sol. La única diferencia es que mandamos, no uno, sino un chorro de electrones, y tenemos un montón de protones. Atendiendo a esto, Robert Hofstadter realizó experimentos cruciales entre 1950 y

1956 en la Universidad de Stanford (Estados Unidos) que establecieron sin ningún género de dudas el tamaño finito del protón y su densidad de carga,

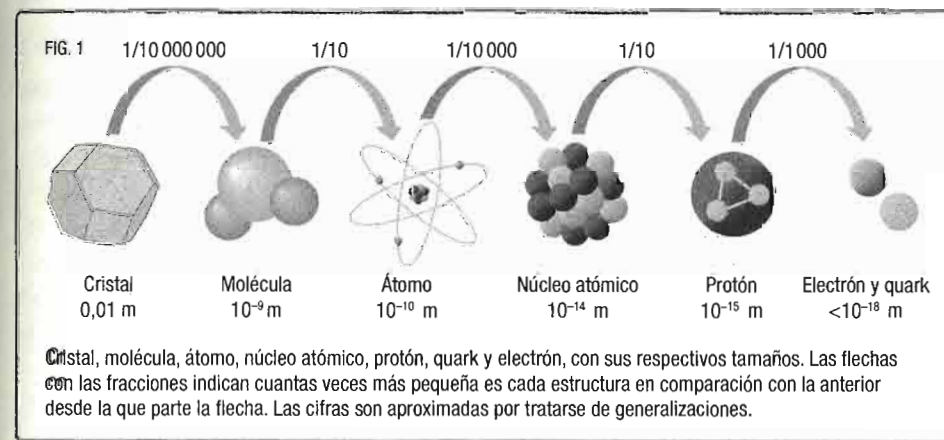
En física ya no queda nada por descubrir.

LORD KELVIN, EN 1880

sugiriendo de este modo su carácter de partícula compuesta.

De hecho, como ya hemos apuntado, los protones están formados por quarks. Pero si están formados por quarks hemos de preguntarnos por qué están juntos y no separados. En comparación con las moléculas, los átomos, los núcleos o los nucleones, hay algo radicalmente distinto en el hecho de que los quarks sean los constituyentes del protón y del neutrón. En términos aproximados, para todos los sistemas la masa total es aproximadamente la suma de las masas de sus constituyentes. En cambio, para los quarks ocurre algo realmente único: la masa total del protón, por ejemplo, es muchísimo mayor que las masas de los quarks. ¿Dónde está la masa que falta? En unas nuevas y misteriosas partículas llamadas *gluones*, que tienen el poder de actuar de argamasa entre los quarks para formar los *hadrones*. Por debajo de los quarks y los gluones no se piensa de momento que haya nada.

La materia es simple y llanamente una agregación de átomos. Estos pueden formar moléculas y dar lugar a estructuras más complejas, aunque al mismo tiempo también ellos son una agregación de partículas (figura 1).



Se necesita una cantidad inmensa de átomos para construir un pedazo de materia de tamaño lo bastante grande como para poder verlo a simple vista y manipularlo con las manos. Sin embargo, y esto es verdaderamente sorprendente, no hace falta que la cantidad sea tan descomunal para que el agregado de átomos tenga un comportamiento como el de las muestras macroscópicas. La utilidad de esta observación es enorme, dado que al menos teóricamente permite reducir la complejidad de las ecuaciones que describen el comportamiento del agregado de átomos sin que deje de parecer materia.

Velocidades extremas

Las velocidades más extremas que podemos imaginar, cero o infinito, no existen. Esta imposibilidad está en consonancia con dos de los hallazgos más importantes del siglo xx: la mecánica cuántica y la relatividad. Si alguien encontrase evidencias en contra, dos de los pilares fundamentales de la ciencia moderna se vendrían abajo.

Una recomendación frecuente por indicación del médico es el reposo absoluto. Pero incluso en un estado que podríamos considerar de inmovilidad absoluta, muchos movimientos siguen produciéndose dentro de nuestro cuerpo, siendo los latidos del corazón y el flujo de la sangre los más evidentes. La misma situación se reproduce a menor escala, ya que en realidad todo está siempre moviéndose porque los átomos en nuestro interior se agitan. Una de las conclusiones más asombrosas de la mecánica cuántica es la ausencia de reposo absoluto, para los átomos y para todo. Podemos estar muertos, dentro de una cámara frigorífica a la temperatura más baja imaginable, y todavía seguiremos vibrando un poco a través de nuestros átomos. ¿Por qué? La mecánica cuántica impone restricciones insoslayables sobre en qué medida podemos localizar una partícula y con qué lentitud puede moverse. Por el mero hecho de estar en el universo, la menor energía cinética que puede tener una partícula, por bajísima que sea, nunca es exactamente cero.

El máximo reposo posible viene gobernado por el *principio de incertidumbre*, que establece que es imposible conocer simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula.

El principio se debe a Werner Heisenberg, su formulación se remonta a 1926, y lo dedujo de manera abstracta mediante manipulaciones matemáticas que él mismo creyó inventar para la ocasión, aunque ya eran conocidas por los matemáticos de su época. Tuvo que transcurrir algún tiempo antes de que los físicos asimilaran el verdadero contenido de dicho principio, que en realidad nos da información sobre cómo el proceso de medición afecta al propio sistema que se estudia. Como casi todo en mecánica cuántica, hay una cierta mística en torno al principio de incertidumbre, porque dice algo muy profundo, pero esto no significa de ninguna manera que no podamos entenderlo.

ONDAS Y PARTÍCULAS

En el pasado, los físicos y la mayoría de las personas tenían muy clara la diferencia entre ondas y partículas. En el caso de las partículas, es fácil pensar en un proyectil o una estrella fugaz, cuerpos que describen una trayectoria a lo largo del espacio. Las partículas puntuales son entes idealizados y en principio aspiran a representar objetos reales arbitrariamente pequeños. Esto simplifica mucho las cosas, y durante siglos se creyó en la inocuidad del concepto. Las partículas grandes representando un sólido rígido las concebimos como una agregación de partículas puntuales cuyas distancias relativas son fijas. Un chorro de partículas, como ocurre en el caso de un fluido líquido o gaseoso, corresponde asimismo a un conjunto de partículas puntuales que se mueven siguiendo determinadas trayectorias. En el caso de las ondas, es fácil pensar en las olas del mar o en la reverberación del sonido de un gong chino o un platillo de una batería. Las ondas cuyo origen es mecánico representan vibraciones de partículas e impulsos energéticos que se transmiten de una a otra, sin necesidad de que se transporte materia.

A diferencia de las partículas, las ondas tienen una propiedad muy especial, y es la capacidad de curvarse o doblar las esquinas. A este fenómeno se le llama *difracción*. El sonido tiene precisamente esa propiedad: si hablamos con alguien situado al otro

lado de la esquina podemos escuchar lo que dice aunque no lo veamos. Pero el sonido también se refleja en las paredes como lo haría una pelota, la cual por su parte no encuentra forma de doblar la esquina. La reflexión del sonido es algo que podemos comprobar mediante la resonancia en una habitación vacía o el eco en las montañas. Cuando el sonido se refleja, no se difracta, y viceversa. ¿De qué depende esta diferencia? De algo que las ondas tienen y resulta característico de ellas: su longitud de onda.

Consideremos una pared que tiene un boquete suficientemente grande. Si disparamos un proyectil muy pequeño perpendicular a la pared, atravesará el boquete o no, y en caso afirmativo, emergerá en la misma dirección; si pasa a través del boquete, no se desvía.

En el caso de una onda, la situación es distinta, dado que la longitud de onda (la que hay entre cresta y cresta) define una longitud que podemos comparar con el tamaño del boquete. Si mandamos olas cuyos frentes sean paralelos a la pared y se propaguen perpendicularmente a la misma, y la longitud de onda es mucho menor, las olas pasarán manteniendo el frente de onda y la dirección de propagación. Si, por el contrario, la longitud de onda es mucho mayor que la abertura, entonces se produce el fenómeno de la difracción, es decir, que las ondas se propagan desde la abertura, que actúa como un foco emisor en todas las direcciones y de forma isótropa. El frente de ondas deja entonces de ser plano para hacerse esférico. En el primer caso, las ondas se transmiten en línea recta, mientras que en el otro lo hacen curvándose en todas las direcciones con igual intensidad.

Otra diferencia entre las partículas y las ondas es que en el caso de las primeras podemos lanzarlas una a una. En otras palabras, la energía viaja empaquetada y localizada en cada una de las partículas. En el caso de las ondas, podemos hacer lo mismo, pero entonces tendremos un pulso con un principio y un final; para que tengan un aspecto ondulado de forma más o menos per-

Creo que puedo asegurar que nadie entiende la mecánica cuántica.

RICHARD FEYNMAN

manente, hemos de mandarlas de forma continua, lo que implica también un continuo gasto de energía.

ANÁLISIS DE FOURIER

Si agitamos bruscamente con un movimiento seco una cuerda larga que yace en el suelo, veremos un pulso que se propaga desde el extremo que sacudimos hasta el final de la misma. Por otro lado, si la agitamos muchas veces veremos un pulso tras otro, de manera que se formará una silueta ondulada. Si no fuera por las fuerzas de rozamiento, esta silueta se mantendría mientras agitásemos el extremo, propagándose cada vez más lejos. Una diferencia notable entre el pulso y la ola es que el primero está localizado, mientras que la segunda se extiende en principio de forma ilimitada. Por tanto, podemos imaginar una ola como una superposición de pulsos. Lo que es menos evidente es que se pueda formar un pulso como una superposición de olas. Joseph Fourier demostró en 1822 que tal milagro es posible. Entonces, si nos preguntamos cuáles son las longitudes de onda contenidas en un pulso de un cierto tamaño veremos que aquellas que sean mayores no estarán. Por ejemplo, un tsunami que tenga una extensión de 100 m no contiene longitudes de ondas mayores de 100 m. Por tanto, si la longitud de onda máxima es λ_{\max} y Δx es el tamaño espacial del pulso, entonces ha de cumplirse que

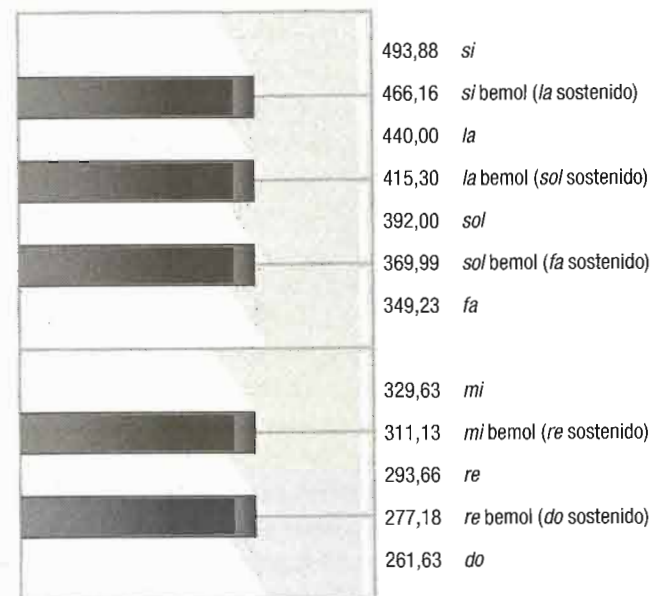
$$\Delta x \geq \lambda_{\max}$$

Hasta ahora hemos ignorado el papel del tiempo. Las ondas no solo oscilan en el espacio sino también en el tiempo. Si nos ubicamos en un punto fijo, las olas suben y bajan de manera periódica, teniendo una relación análoga entre la duración Δt y el periodo máximo contenido τ , o mejor su frecuencia mínima $\nu = 1/\tau$

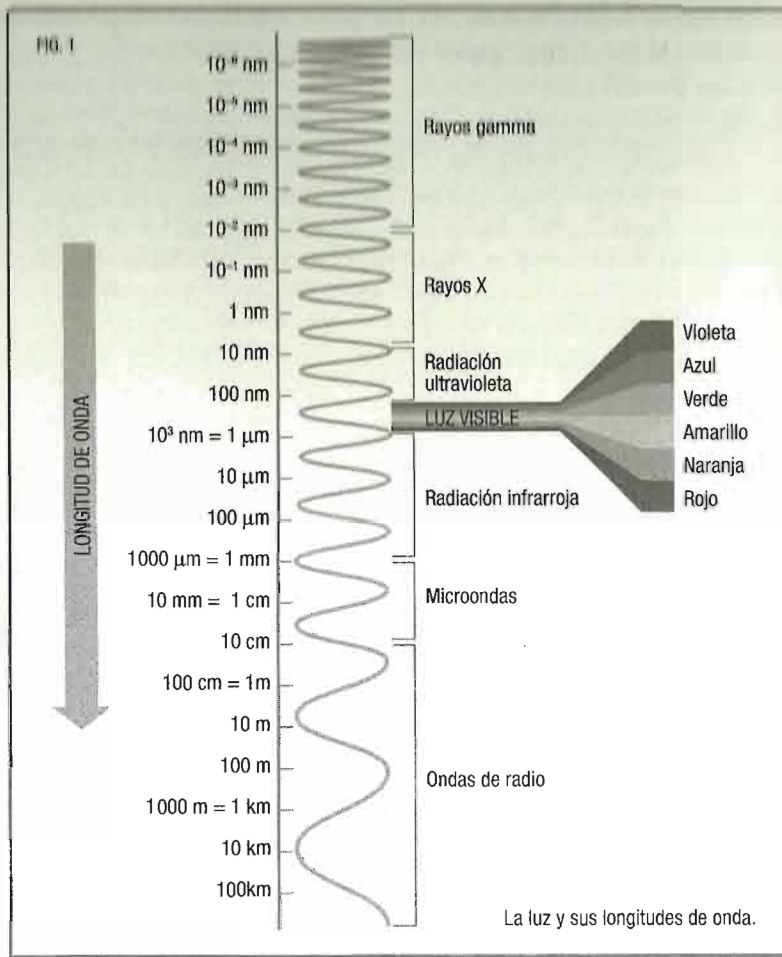
$$\Delta t \geq \tau_{\max} = 1/\nu_{\min}$$

ESCALA MUSICAL EN EL PIANO Y SUS FRECUENCIAS

El principio de incertidumbre es algo que se usa a menudo al interpretar música. Si queremos afinar un instrumento musical con precisión, deberemos tocar durante un tiempo suficientemente largo, ya que si lo hacemos durante poco rato no seremos capaces de afinar o de detectar una desafinación. Por ejemplo, la nota *la* natural, que se usa como referencia para afinar, tiene una frecuencia de 440 vibraciones por segundo (hercios, Hz), mientras que las notas que están un semitono por encima o por debajo se encuentran a 466,16 Hz (*la* sostenido) y 415,30 Hz (*la* bemol), respectivamente, es decir, ± 25 Hz. La figura muestra sus posiciones en un teclado de piano. Para poder distinguir la nota *la* de sus semitonos hemos de tener un ancho de banda de 25 Hz y, por tanto, necesitamos al menos $\Delta t = 1/25 = 0,04$ segundos para percibir y distinguir el sonido *la* natural de sus sonidos más inmediatos. Tocar más de veinticinco notas en un segundo no tiene ninguna utilidad musical, aunque de todos modos ningún músico puede tocar tan rápido. La famosa y trepidante pieza de violín *El vuelo del moscardón* de Rimski-Kórsakov requiere «solo» diez notas por segundo.



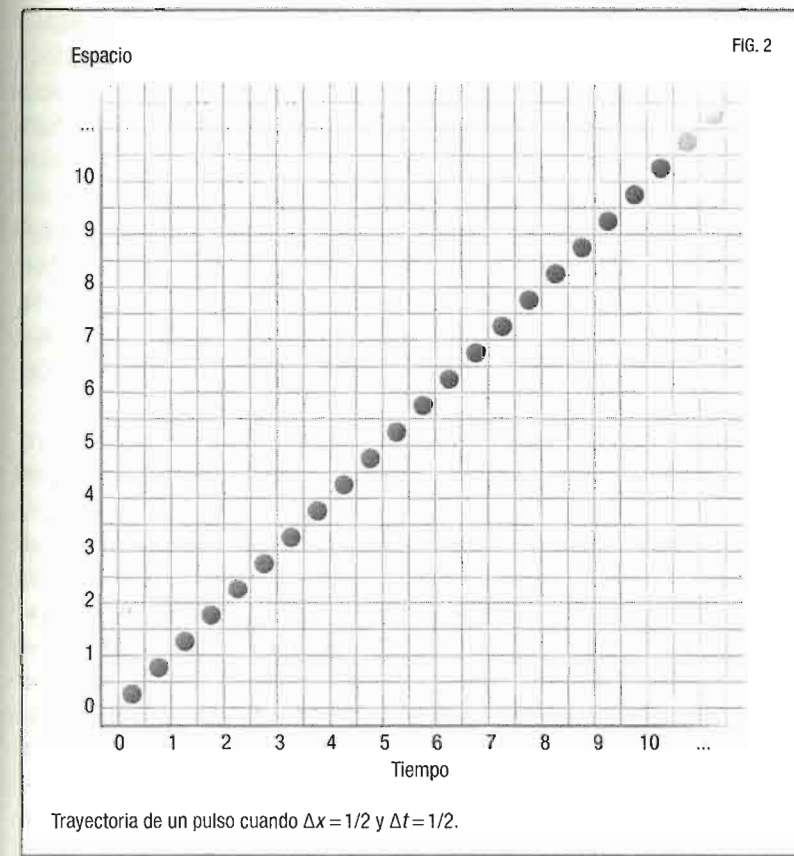
Escala musical en un teclado de piano. Se indican las notas así como las equivalencias entre bemol y sostenido.



Si lo aplicamos a la luz, tenemos que la luz visible, correspondiente a los colores del arcoíris, abarca una gama de longitudes de onda de varios cientos de nanómetros (figura 1). La relación anterior indica algo muy interesante: con luz de una determinada longitud de onda no podemos ver detalles más pequeños que dicha longitud de onda, es decir, somos ciegos a distancias menores que ella y perdemos resolución. Cuanto mayor sea la resolución, tanto menor será la longitud de onda y por consiguiente

tanto mayor será la frecuencia. La luz visible tiene longitudes de onda que abarcan típicamente el tamaño de entre 1000 y 10000 átomos. Para ver los detalles del átomo, hemos de utilizar rayos X. En el caso de los núcleos atómicos necesitamos rayos gamma. En el extremo opuesto, las ondas de radio con centenares de metros pueden difractarse a su paso por las montañas.

Dadas estas limitaciones para la duración y el tamaño del pulso, podemos mirar qué ocurre cuando medimos distancias y tiempos con precisiones más pobres que Δx y Δt , respectivamente. Si subdividimos el espacio y el tiempo en unidades de tamaño Δx y Δt respectivamente (figura 2) el pulso irá pasando



por cada una de ellas, de manera que podemos interpretarlo como una partícula que salta de una celdilla a otra. Dentro de esta imprecisión podremos trazar una trayectoria difusa que nos parecerá una perfecta línea recta a escalas mayores, tal como se aprecia en la figura 2. Por consiguiente, estas son limitaciones para el grosor mínimo de un rayo de luz que aumenta cuando nos acercamos al infrarrojo y disminuye hacia el ultravioleta.

DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA

Pues bien, estos fenómenos ondulatorios se han observado tanto para la luz como para el sonido. El caso de la luz es especialmente interesante por la polémica suscitada entre Isaac Newton y Christiaan Huygens en el siglo XVII sobre la naturaleza corpuscular u ondulatoria de la luz. En realidad, ambos tenían razón. Newton se basaba en que los rayos de luz se desviaban al paso de lentes como si fuesen chorros de partículas, mientras que Huygens observó fenómenos difractivos muy claros. La luz visible tiene una amplia gama de longitudes de onda que recorren la gama de colores del arcoíris, desde el borde del infrarrojo hasta el del ultravioleta. Por tanto, para que observemos la difracción el tamaño de la ranura ha de ser comparable.

El proceso por el que se forma el *patrón de difracción* sobre una placa fotográfica es particularmente interesante, dado que se oscurece en presencia de luz debido a un proceso de oxidación. Este es el llamado *efecto fotoeléctrico* y el grado de oscurecimiento refleja tanto el tiempo de exposición a la luz como la intensidad de la misma. Si bajamos la intensidad de la luz suficientemente veremos que el patrón de difracción no se forma de inmediato, sino de manera paulatina. Es decir, no tendremos una imagen completa y tenue sino una imagen incompleta formada por puntos, que irá conformándose como una imagen continua a medida que el número de puntos crece. La interpretación de este fenómeno se debe a Einstein en 1905 y es la siguiente: la luz está formada por paquetes de energía, los fotones, que causan

la oxidación al expulsar un electrón del material. El patrón de interferencia que se va formando corresponde a la probabilidad de que un fotón golpee la pantalla. La relación entre la energía y la frecuencia de la luz viene dada por la fórmula propuesta originalmente por Planck en 1900 en su estudio de la radiación del cuerpo negro,

$$E = h\nu$$

donde h es la constante de Planck, E es la energía del fotón y ν es su frecuencia.

Pero además, y esto es algo más sorprendente, la difracción también ocurre para partículas subatómicas como electrones, protones o neutrones cuando sus flujos son suficientemente caudalosos y los boquetes son lo bastante pequeños. En conjunto, todos estos experimentos prueban la dualidad onda-corpúsculo propuesta teóricamente por Louis de Broglie en 1924 y que se resume en la fórmula universal

$$\lambda = h/p$$

donde λ es la longitud de onda, $p = mv$ es el momento lineal de la partícula y h es la constante de Planck. La generación discontinua del patrón de difracción en el caso de los electrones sigue las mismas pautas que en el caso de los fotones, y la interpretación probabilística, propuesta por Max Born (1882-1970), físico y matemático alemán que recibió el premio Nobel de Física en 1954 por sus investigaciones en mecánica cuántica, también vale para partículas subatómicas como el electrón.

Estas relaciones han sido verificadas experimentalmente tanto para fotones como para electrones. Para los fotones se tiene que $\lambda\nu = c$, lo que quiere decir que $E = cp$. Esta es la relación que hay entre la energía y el momento de un fotón.

EL PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN

Si combinamos las relaciones de Planck y de De Broglie con el análisis de Fourier, y tomamos $\Delta p = p_{\min}$ y $\Delta E = E_{\min}$, en el mejor de los casos se tiene

$$\Delta x \Delta p = h$$

$$\Delta t \Delta E = h$$

las cuales son básicamente las *relaciones de incertidumbre de Heisenberg* (en realidad sus relaciones incluyen un factor $h/4\pi$, pero eso es porque su definición de tamaño y periodo era diferente). Lo más llamativo de estas relaciones concierne a la interpretación de cómo el proceso de medición afecta al sistema bajo estudio. Esto no es algo exclusivo de la mecánica cuántica, sino inherente a la propia acción de medir. Cuando medimos la temperatura del agua en un recipiente, por ejemplo, lo hacemos introduciendo un termómetro que en general tendrá una temperatura diferente. Tras un cierto tiempo la temperatura se estabiliza porque se ha establecido el equilibrio entre el termómetro y el agua. Normalmente, si la masa del termómetro es mucho menor que la del agua, no esperamos que el proceso de medición afecte de forma significativa. Pero si son comparables, o peor aún, pretendemos medir la temperatura de una gota, la situación se invierte por completo y la «medida» reflejará principalmente la temperatura del termómetro antes de la medición. Por supuesto, podemos tratar de construir otro termómetro mucho más pequeño, pero tanto la cuantización de la materia como la de la radiación nos ponen un límite inferior.

El llamado *microscopio de Heisenberg* es un experimento imaginario que nos aclara las cosas. Supongamos que un electrón se mueve en su órbita y queremos determinar su posición. ¿Cómo lo hacemos? Para verlo hemos de iluminarlo, y constatar cómo la luz se refleja en él. Pero la luz está formada por fotones, de manera que estos chocan con el electrón y le hacen

retroceder. Lo mínimo que podemos hacer es lanzar solo un fotón y estudiar cómo se desvía al colisionar con el electrón. Sin embargo, si queremos determinar la posición con mucha precisión, necesitamos un fotón con una longitud de onda corta, lo que significa alta frecuencia y por tanto alta energía.

Esto hace que el cambio de velocidad del electrón sea muy grande. Si por el contrario queremos determinar su velocidad de forma precisa, hemos de mandar un fotón poco energético, es decir, de baja frecuencia, y por tanto gran longitud de onda, con lo que perdemos resolución espacial.

De alguna manera, si tuviéramos un sistema en reposo absoluto, las relaciones de Heisenberg nos dicen que dicho sistema podría estar en cualquier sitio. Dicho de otro modo, si sabemos que la partícula se encuentra en una zona localizada del espacio, entonces podemos estimar la mínima velocidad posible. Esto es muy útil, porque nos da una idea aproximada sobre las energías mínimas que podemos esperar. De hecho, podemos clasificar las escalas de energías según el tamaño del sistema en el que se encuentren.

Si el mero hecho de estar confinado a una región del espacio pone un límite inferior al estado de movimiento, entonces tenemos también una limitación a la energía mínima que puede tener una partícula cuántica. Por tanto, la mecánica cuántica relaciona las escalas típicas de longitud de un sistema con sus energías típicas.

INTERFERENCIAS: FERMIONES Y BOSONES

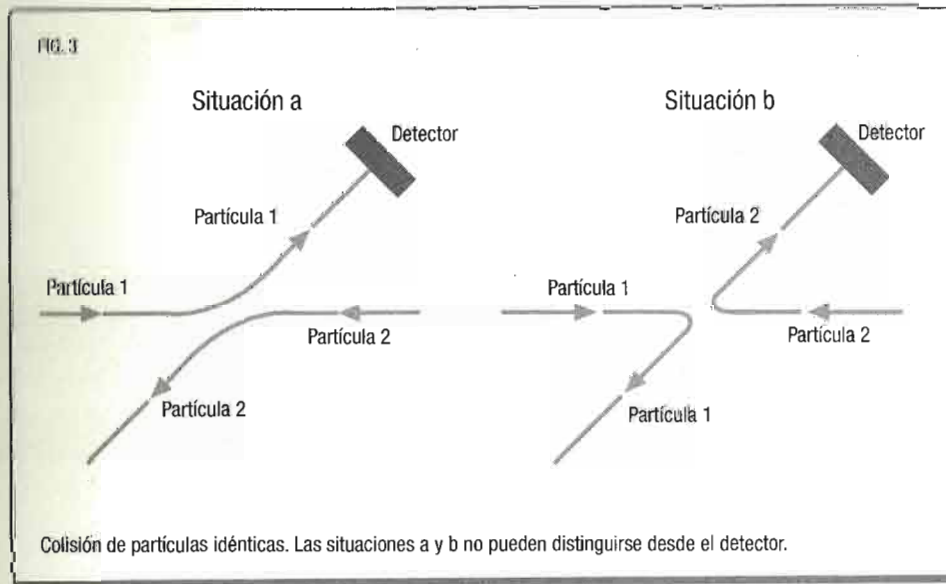
La universalidad que implica el que todos los electrones o todos los protones o todos los átomos de un mismo elemento sean idénticos nos permite evitar un tratamiento «personalizado». Esto tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Por un lado reduce el número de tipos distintos de partículas a estudiar (hay

La incertidumbre es incómoda,
pero la certidumbre es absurda.

VOLTAIRE

veinte en total en el modelo estándar) pero por otro supone una pérdida de información. Para entender las consecuencias, imaginemos que dos hermanas gemelas, Carmen y Rosa, caminan en línea recta y solo cambian de dirección o sentido cuando hablan entre sí. Si las vemos entrar por las puertas N (norte) y S (sur) de un edificio, respectivamente, y tras un rato las vemos salir por las puertas E (este) y O (oeste), sabremos que han hablado pero no tenemos forma de saber si Carmen fue de N a E y por tanto Rosa de S a O, o al contrario. Lo mismo pasa si salen por N y S; no podemos saber si pasaron de largo sin hablarse o si lo hicieron y retroceden sobre sus pasos. En ambos casos los procesos son indistinguibles. Con las colisiones de partículas se dan situaciones comparables (figura 3).

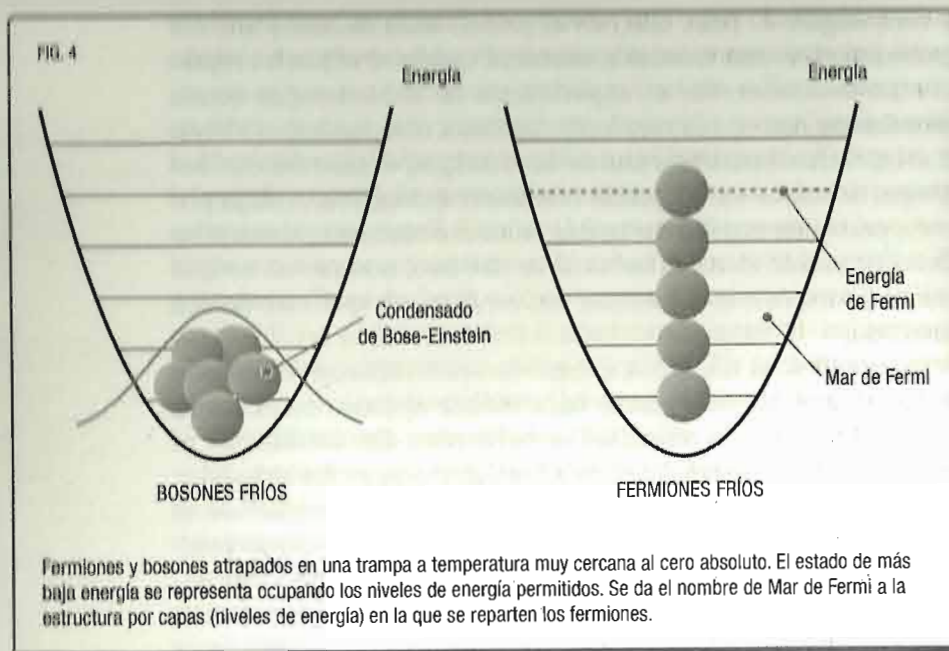
En mecánica cuántica las cosas se complican, dado que hemos de pensar en ondas que interfieren, y el patrón de interferencia debe ser el mismo cuando intercambiamos una partícula por otra. Esto se cumple solamente en dos casos concretos: el primero es cuando mandamos dos pulsos idénticos positivos uno contra otro, y el segundo, cuando mandamos uno positivo



y otro negativo. Pues bien, en el primer caso decimos que los pulsos representan bosones, mientras que en el segundo, representan fermiones. En un experimento de doble rendija donde mandamos dos ondas correspondientes a dos partículas idénticas que atraviesan cada una de las rendijas, el intercambio entre partículas se corresponde con intercambiar una rendija por otra; podemos mandar las ondas en fase o bien en oposición de fase. El patrón de interferencia es distinto, aunque en ambos casos podríamos intercambiar las rendijas sin que este se vea alterado.

Ahora bien, si tomamos el caso de los fermiones, cuando la separación entre rendijas se hace menor el pulso en el punto medio es cero, y la amplitud se hace cero. En cambio, en el caso de los bosones la intensidad se hace cuatro veces mayor. Por otro lado, cuando no hay interferencia la intensidad es el doble. Lo que se ha encontrado es que los electrones se comportan como fermiones y los fotones lo hacen como bosones. En la interpretación probabilística, lo que nos dice este resultado es que la probabilidad de que dos fermiones estén en el mismo punto es cero, mientras que la probabilidad de que dos bosones lo estén es máxima. El hecho de que los fermiones eviten estar en el mismo estado se llama *principio de exclusión de Pauli*. Fue enunciado por el austriaco Wolfgang Ernst Pauli en 1925 para poder explicar la estructura de los átomos y la disposición de estos en la tabla periódica, y le valió el Nobel de Física en 1945.

Si aplicamos todo esto a ondas estacionarias en una caja, hay una gran diferencia entre los estados que podemos ocupar. En el caso de los fermiones solo podemos ocupar un estado con una partícula, mientras que en el de los bosones no hay restricciones. Por tanto, en igualdad de condiciones el estado de mínima energía corresponde a bosones. Los fermiones nos recuerdan a cuando vamos a un concierto con entradas no numeradas: todos quieren estar lo más cerca posible del intérprete pero una butaca solo la puede ocupar una persona. Esto implica que hay un estado que tiene la energía máxima, llamada *energía de Fermi*, de entre todos los estados disponibles para los fermiones. La



butaca de Fermi es la más lejana al escenario. Para partículas atrapadas en una trampa a casi el cero absoluto la situación se indica en la figura 4.

ESTADOS CUÁNTICOS CON TEMPERATURA

La aplicación de la mecánica cuántica a la materia como un todo requiere tener en cuenta el efecto que causa la temperatura. El caso más paradigmático consiste en el gas cuántico de partículas idénticas, es decir, partículas que tienen exactamente las mismas propiedades. Incluso en ausencia de interacciones, dichos sistemas poseen propiedades cuánticas genuinas y solo cuando la temperatura es suficientemente alta se comportan como partículas clásicas. En cambio, a bajas temperaturas se clasifican en dos categorías bien diferenciadas atendiendo a si cumplen o no el principio de exclusión de Pauli: los fermiones

y los bosones. El principio de exclusión hace que los fermiones experimenten una repulsión de origen cuántico cuando se les comprime. Los bosones por su parte tienden a agruparse en estados semejantes.

Al igual que la densidad de moléculas en el aire decrece con la altura, esto es, con la energía potencial, según la fórmula barométrica, el número de ocupación de las partículas en una trampa decrece a medida que subimos en la energía. A altas temperaturas no hay diferencia entre fermiones y bosones. En cambio, a medida que la temperatura baja, las diferencias se hacen más y más patentes.

La mecánica cuántica pone un límite al movimiento más lento imaginable, pero, como hemos visto, la expresión del movimiento medio en un sistema macroscópico es la temperatura. Esto significa que en el límite termodinámico es posible alcanzar la menor temperatura posible apurando al máximo la mínima energía alcanzable. La máxima longitud de onda de De Broglie alcanzable es el tamaño del universo y ahí ha de caber todo, incluidos los aproximadamente 10^{80} electrones y 10^{80} protones que hay en él. Sin embargo, para un número de partículas dado, y debido al principio de exclusión, esperamos que la mínima temperatura se alcance con bosones en la mayor caja posible.

El estado de más baja temperatura posible es el *condensado atómico de Bose-Einstein* (figura 4). Consiste típicamente en un conjunto del orden del millón de átomos que están ocupando estados de mínima energía en una trampa magnética que hace las veces de botella, y con los cuales se ha batido el récord de bajas temperaturas conocido, $4 \cdot 10^{-10}$ K. La longitud de onda de De Broglie asociada al condensado de Bose-Einstein tiene el tamaño del diámetro de la Tierra.

La obtención de condensados ha supuesto una revolución en la física atómica y en la óptica cuántica. Casi siempre se cumple una especie de principio de conservación de la dificultad, según el cual cuando los cálculos teóricos son fáciles, los experimentos son difíciles y viceversa. La separación entre lo que es trivial y lo que es imposible es muy estrecha; este es el carácter esquivo de la naturaleza que guarda celosamente sus secretos,

y el oficio del físico es burlar la vigilancia. Por eso, la manipulación de trampas iónicas se ha convertido en un virtuosismo excepcional que permite hacer experimentos de ensueño para deleite de los físicos teóricos. Se puede controlar a placer la interacción de dos átomos, como si realmente tuviéramos un dial, que permite maquinar y sintonizar los más intrincados experimentos.

LOS LÍMITES RELATIVISTAS DEL MOVIMIENTO

Una de las cosas que miramos cuando compramos un coche o una moto es el tiempo que tarda en ponerse de cero a 100 km/h. Esto lo conseguimos mediante una aceleración constante. Ahora bien, por mucho que aceleremos hay una velocidad máxima que nunca podemos sobrepasar: la velocidad de la luz en el espacio vacío de materia, que se redondea a $c = 300\,000$ km/s. Es un valor enorme que permitiría dar siete vueltas y media a la Tierra en un segundo, viajar desde la Tierra al planeta Marte en un promedio de aproximadamente 12 minutos o desde el Sol a la Tierra en unos 8 minutos. Esta velocidad marca un límite a la rapidez con que puede ocurrir cualquier fenómeno del universo. Aun así, hay sucesos que se inician y terminan en lapsos asombrosamente breves, mientras que en el extremo opuesto hay fenómenos y edades que también superan con mucho a nuestra escala cotidiana del tiempo. En la imagen de las págs. 88-89 puede verse una selección de edades y duraciones de fenómenos, las cuales abarcan ambos extremos.

Sucesos

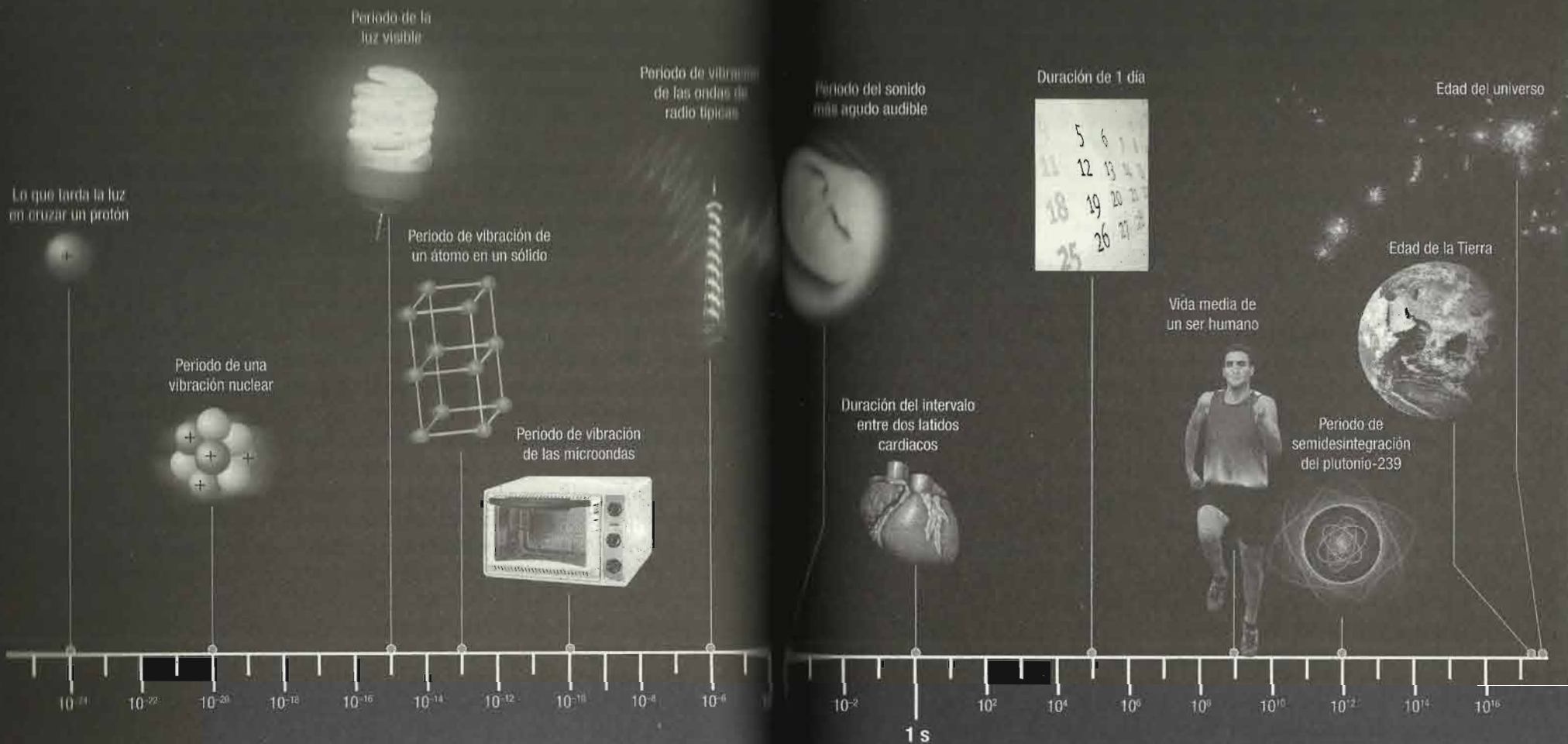
Cuando concertamos una cita con alguien especificamos el lugar y la hora. En física lo llamamos *suceso* o evento y para él hemos de detallar tanto las coordenadas del espacio tridimensional (longitud, latitud y altitud) como el tiempo. De ese modo especificamos mediante cuatro números la trayectoria de un planeta,

un proyectil u otro objeto. Cuando, por ejemplo, nos movemos sobre una línea recta especificamos la trayectoria representando los puntos para cada valor del tiempo, y podemos ignorar las dos direcciones transversales al movimiento. Así podemos preguntarnos cómo se ordenan en el tiempo dos sucesos históricos. Lógicamente esperamos que solo los sucesos anteriores influyan sobre los posteriores. Esto es fácil de decidir cuando las cosas ocurren en el mismo sitio, pero ¿qué pasa cuando hablamos de lugares diferentes? Un aspecto importante tiene que ver con la velocidad de transmisión de la información.

Durante mucho tiempo se pensó que la luz se transmitía de forma instantánea, porque las distancias que se utilizaban para medir eran mucho menores que 300 000 km. Galileo lo intentó usando candiles entre dos montes que distaban 5 km. Hubiese necesitado un reloj que midiese con una precisión de cien milésimas de segundo, algo impensable para la época. George Gamow en uno de sus libros de la serie *Mr. Tompkins* fantasea con un mundo en el que la velocidad de la luz fuese de unos 30 km/h, y en el que debido a ello muchos de los aspectos sorprendentes de la relatividad se ponen de manifiesto en la vida cotidiana de sus habitantes.

En cualquier caso, por mucho que intentemos acelerar, no es posible superar la velocidad máxima de la luz. Además, se ha encontrado que la velocidad de la luz es la misma en todas las direcciones aunque nos encontremos en movimiento. De no ser así, podríamos sobrepasarla emitiendo desde dicho sistema. Por ejemplo, para un coche que disponga de faros traseros y delanteros la luz de estos últimos tarda lo mismo en recorrer una distancia hacia delante que lo que tarda la emitida por los faros traseros hacia atrás. Esto contradice el sentido común cotidiano. En esto, la luz se diferencia completamente del sonido; la velocidad del sonido en movimiento es diferente de la del sonido en reposo. Como se ha dicho, el sonido se propaga a unos 340 m/s; así pues, para un coche que se mueva a 40 m/s, la velocidad del sonido hacia delante es de $340 + 40 = 380$ m/s, mientras que hacia atrás es de $340 - 40 = 300$ m/s. Todo esto se basa en la regla de sumar velocidades: si me muevo con una velocidad v dentro de un tren

ESCALA EXTREMA DEL TIEMPO



El tiempo marca nuestra vida cotidiana, pero también rige procesos tan breves o tan largos que jamás podríamos conocer su existencia de no ser por los avances de la ciencia. Algunos de los fenómenos más breves representados en la imagen duran un poco más o un poco menos de 1 attosegundo (10^{-18} segundos). Aproximadamente, un attosegundo es a un segundo lo que un segundo es al tiempo que ha transcurrido

desde la creación del universo. Esto significa que la materia puede experimentar el paso del tiempo de maneras extremas: un instante casi infinitesimal para el periodo de una vibración en el núcleo de un átomo, y casi una eternidad para que ese mismo átomo acabe formando parte de un planeta.

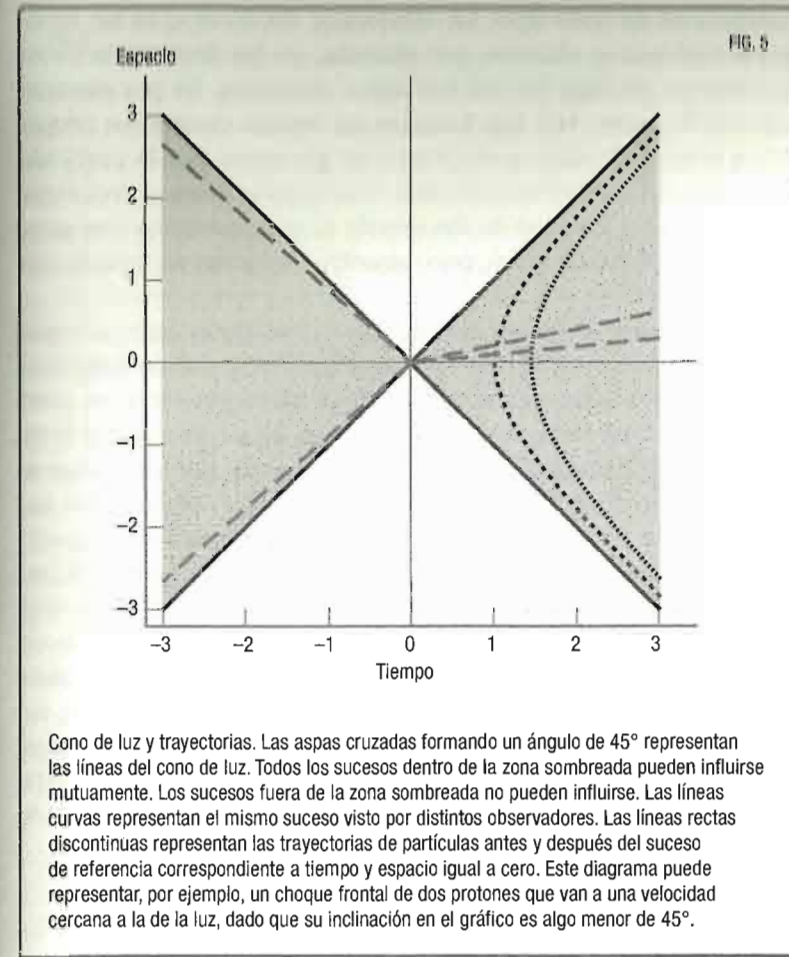
que va a velocidad v' respecto del terreno sobre el que circula, yo me muevo a velocidad $v + v'$ respecto de este último.

El hecho de que exista una velocidad límite de transmisión de la información significa que hemos de andar con cuidado cuando decimos que dos sucesos ocurren al mismo tiempo si no nos encontramos en el mismo lugar ni en reposo relativo. Para empezar, no podemos controlar nuestra posible influencia sobre el pasado o el futuro de manera arbitraria. Es decir, disponemos de coartadas basadas en el *principio de causalidad*, según el cual las causas han de preceder a su efecto. Este recurso es de uso recurrente en las novelas policíacas, donde el presunto asesino «no tuvo tiempo» de cometer el crimen.

La forma gráfica de representar un suceso es mediante unos ejes coordenados donde ponemos unas aspas que delimitan lo que se denomina cono de luz (figura 5). Dentro del mismo, los sucesos se pueden influir mutuamente, pero aquellos que estén fuera de él son del todo inaccesibles. Para analizar las consecuencias del cono de luz más fácilmente, es conveniente usar el segundo-luz como unidad de longitud ($= 300\,000$ km) y el segundo como unidad de tiempo (también se pueden usar minutos o años), dado que corresponde a usar unidades donde $c = 1$. Dentro del cono de luz podemos alcanzar lugares que estén a x segundos-luz de distancia en menos de x segundos. De igual modo, en x segundos no podemos influir en sucesos que ocurran a más de x segundos-luz de distancia. En estas unidades, las aspas del cono de luz tienen una inclinación de 45° , dado que corresponden a las rectas $x = ct$ y $x = -ct$. Todos los sucesos (x, t) con valores $-ct < x < ct$ son alcanzables desde el suceso $(0, 0)$.

Efectos relativistas

Desde luego, algo raro tiene que pasar para que la luz no viaje ni más rápida ni más lenta cuando la emitimos desde un lugar en movimiento con velocidad constante. El físico neerlandés Hendrik A. Lorentz (1853-1928) se dio cuenta de que si eso es así, cuando relacionamos dos sucesos espacio-temporales des-



de sistemas en movimiento relativo, el espacio y el tiempo medidos por cada observador dependen de la velocidad de la luz. Cuando esa dependencia se tiene en cuenta, hace que los objetos en movimiento aparezcan como contraídos en la dirección del movimiento y el tiempo parezca que discurre más lentamente. A pesar de ir contra el sentido común cotidiano, ambos efectos han sido comprobados experimentalmente. La *contracción de Lorentz* relativista es un efecto importante en colisiones muy

energéticas de todo tipo. La *dilatación del tiempo* es un fenómeno real que se observa, por ejemplo, en las desintegraciones de muones producidos por los rayos cósmicos. Es por eso que superan la corta vida que tendrían en reposo cuando se propagan a gran velocidad en el chaparrón generado por la partícula que viene del confín del universo. O sea, que podemos prolongar nuestra vida a los ojos de los demás si nos movemos con gran rapidez respecto de ellos, pero nosotros mismos no notaremos ningún cambio.

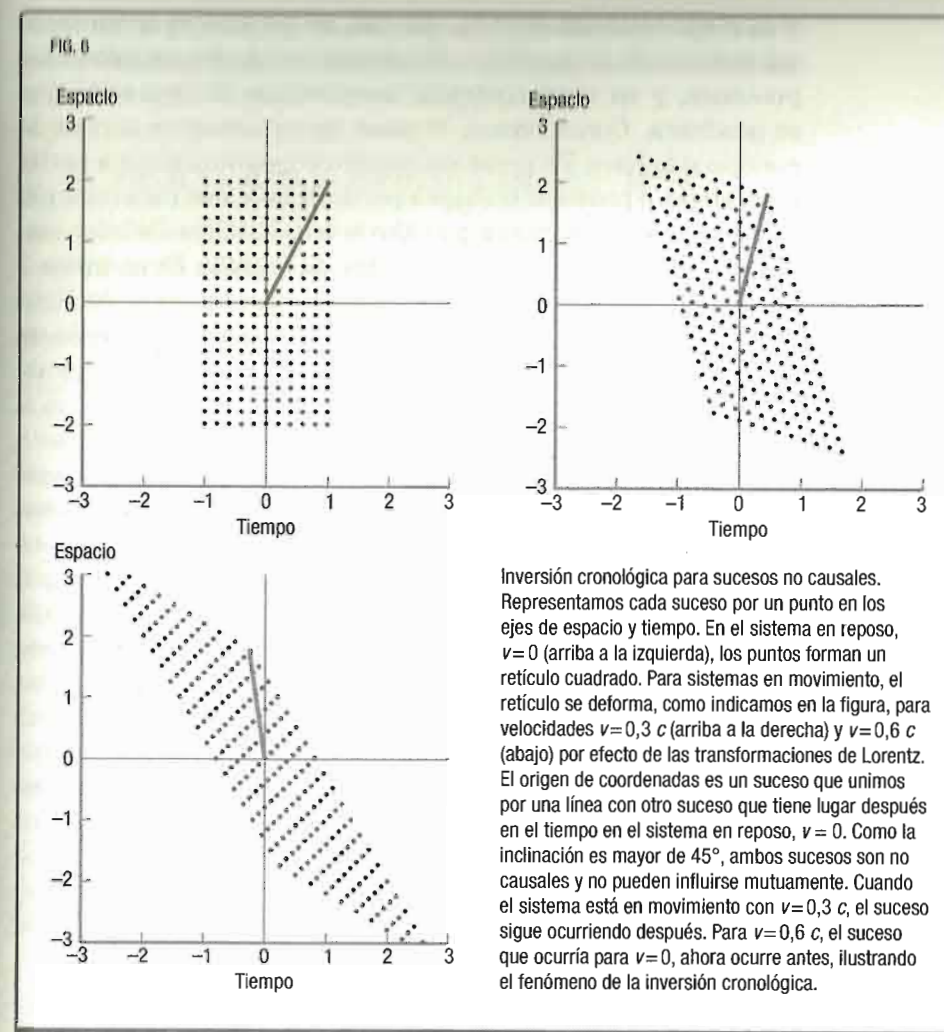
La *transformación de Lorentz* es una relación entre el espacio-tiempo de sucesos vistos por un observador y el de esos mismos sucesos vistos por otro. En la figura 5 representamos cada suceso con un punto, de forma que cada punto se corresponde con otro. Por ejemplo, los puntos en las líneas curvas representan el mismo suceso visto por distintos observadores. Los sucesos dentro y fuera del cono de luz no son causales, es decir, no hay manera de comunicarlos usando señales, aunque viajen a la velocidad de la luz. Uno de los resultados más asombrosos de la relatividad es que es posible alterar la cronología. Dicho en otras palabras, permite cambiar el pasado por el futuro sin más que cambiar de sistema de referencia (figura 6). Sin embargo, no se puede violar la causalidad: dos observadores pueden ver dos sucesos aislados ocurriendo en orden cronológico inverso, pero tales sucesos no pueden estar causalmente relacionados entre sí, o lo que es lo mismo, no pueden influirse mutuamente.

Masa y energía

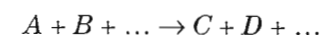
El resultado estrella y probablemente más asequible de la teoría de la relatividad de Einstein es la relación que hay entre la masa de una partícula en reposo, m , y su energía E ,

$$E = mc^2.$$

Según esta fórmula, la transformación íntegra de 1 kg de materia en energía genera $E = 9 \cdot 10^{16} \text{ J} = 25 \text{ TWh}$. Esta es la base de



la energía nuclear que se produce en el Sol y en las centrales nucleares construidas por el hombre. Por otro lado, también permite crear masa a partir de energía. La regla es muy sencilla. Ante una reacción

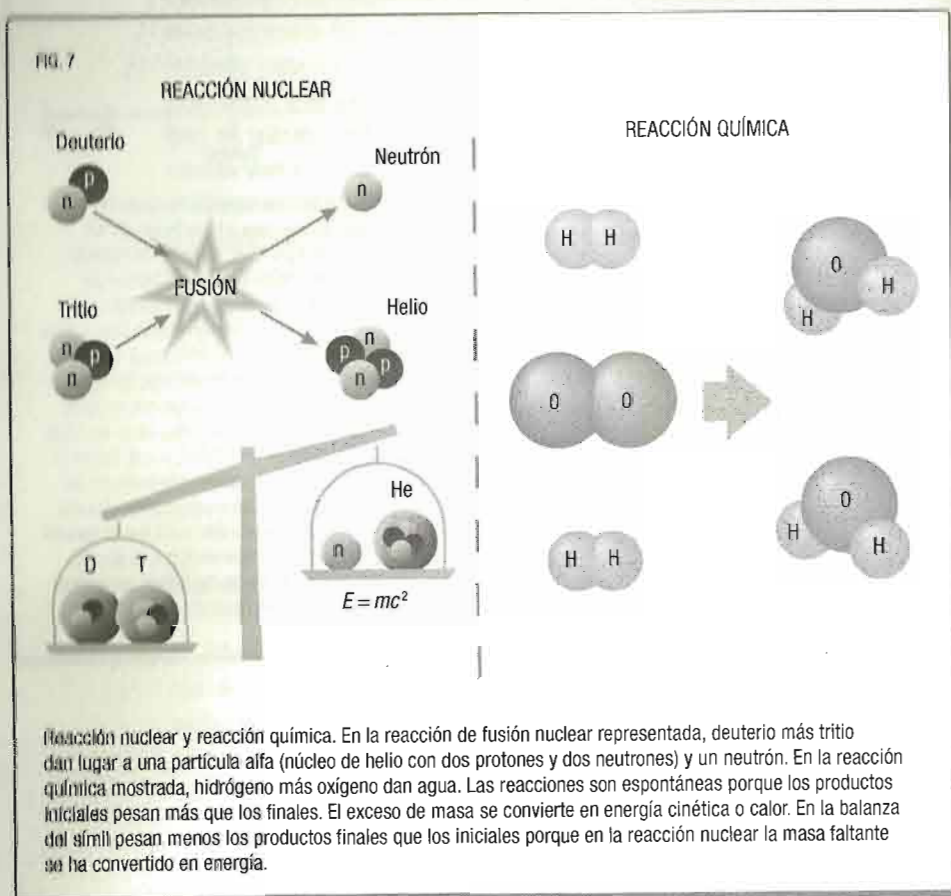


si la masa total antes de la reacción es mayor que la masa total después de la reacción, entonces esta ocurre de forma espontánea, y en caso contrario necesitamos energía para que se produzca. Como vemos, la masa no se conserva aunque la energía sí lo hace. En resumen, podemos producir masa a partir del trabajo, o producir trabajo a partir de la masa. Esta relación establece que masa, trabajo y calor son todos ellos distintas manifestaciones de un mismo concepto: la energía. En la figura 7 mostramos el proceso de fusión nuclear de deuterio y tritio. Esto se aplica igualmente a las reacciones químicas. Por ejemplo, la

combustión del hidrógeno, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, el proceso inverso a la hidrólisis, es explosiva, porque el cambio de masa ΔM es para un mol de O_2 ($= 32 \text{ g}$) y 2 moles de H_2 ($= 2 \text{ g}$):

$$2M(\text{H}_2) + M(\text{O}_2) - 2M(\text{H}_2\text{O}) = \Delta M = 6,3 \cdot 10^{-9} \text{ g}.$$

Comparada con la masa total antes de la reacción, unos 36 g, esta diferencia es ínfima (10 órdenes de magnitud) y no puede medirse ni con las mejores balanzas disponibles actualmente. Sin embargo, el calor producido ($Q = c^2 \Delta M = 137 \text{ Kcal}$) debido a la energía cinética de los productos puede medirse fácilmente, y volatizaría un bloque de hielo de 1,37 kg, transformándolo en vapor de agua. Esto explica que ni Mijaíl Lomonósov en 1745 ni Antoine Lavoisier en 1785 se dieran cuenta de este efecto cuando establecieron la ley de conservación de la masa en las reacciones químicas, ya que para ellos calor y masa eran entidades diferentes que no se pueden mezclar, pero como vemos ambos pueden hacerlo a través de la energía. Recíprocamente, si lanzamos un protón contra un núcleo podemos invertir su energía cinética en producir partículas, y cuanto mayor sea esta, mayor será el número de partículas. Cuanta más masa produzcamos, más lentamente se moverán las partículas producidas. En las colisiones protón-protón en el LHC (por las iniciales en inglés de *Large Hadron Collider*), 14 TeV (teraelectronvoltios) pueden producir hasta 100 000 piones. Estos son eventos de gran multiplicidad de partículas, que en realidad son poco frecuentes.



Interacciones extremas

La existencia de velocidades máximas y mínimas tiene implicaciones tan profundas como insospechadas. La unión de la mecánica cuántica de Heisenberg, Schrödinger y Born con el principio de relatividad de Einstein produce un nuevo paradigma teórico con propiedades tan aparentemente exóticas como exitosas en sus predicciones.

Si metemos la mecánica cuántica y la relatividad en la coctelera, surgen nuevos fenómenos y muchas más paradojas. La *teoría cuántica de campos* (TCC) es un marco de teorías fundamentales que, por coherencia lógica, limita el tipo de fuerzas que son posibles para que dichas teorías tengan poder predictivo y estén libres de contradicciones internas. El camino tortuoso que ha llevado hasta el producto final se ha visto ampliamente recompensado por la predicción de nuevos efectos luego corroborados y por la explicación de efectos ya conocidos.

El concepto clave es un proceso denominado *renormalización*. Básicamente, la idea subyacente es que las propiedades de un sistema dependen de la resolución espacial y temporal que tengamos. Un símil del concepto, extraído de la vida cotidiana, es el hecho de que el argumento de una película puede resumirse en unas pocas frases y en mucho menos tiempo de lo que dure, y de hecho miramos la sinopsis o el tráiler antes de decidir si ir a verla. Podemos imaginar que si vemos una película a 24 fotogramas por segundo y la imagen tiene 600×300 píxeles, se pueden quitar la mitad de fotogramas y reducir el pixelado a la mitad y probablemente no perdamos una parte sustancial del argumen-

to. El requerimiento de la renormalización es que no obtendremos más información relevante si aumentamos los fotogramas y el número de píxeles de forma arbitraria; lo único que haremos será ganar en precisión. Las películas «no renormalizables» son aquellas en las que el resumen esconde muchos detalles esenciales, y entonces no hay más remedio que ir a verla entera!

La exigencia de *renormalizabilidad* se ha revelado crucial para el desarrollo de la TCC puesto que nos dice que podemos hurgar todo lo que queramos en la estructura espacio-temporal pero finalmente solo sacaremos correcciones pequeñas. Así ha surgido la *electrodinámica cuántica*, como teoría de las interacciones entre fotones y electrones donde los únicos parámetros que entran son la carga y masa del electrón así como la constante de Planck y la velocidad de la luz. El hecho de que una construcción teórica de este tipo permita calcular, en consonancia con el experimento, el momento magnético del electrón, es uno de los mayores triunfos de la ciencia moderna. Al hilo de estos éxitos, ha emergido la *cromodinámica cuántica* como teoría fundamental de la interacción fuerte que pretende describir desde la estructura interna de los hadrones como el pión o el nucleón en términos de quarks y gluones, hasta los más de 3000 átomos existentes de un mismo elemento pero con distinto número de neutrones en su núcleo, también conocidos como isótopos. Hasta la fecha, no existe ninguna evidencia negativa en contra de la teoría. Sin embargo, no hay una única teoría aún que unifique todas las interacciones: la nuclear fuerte, la débil, la electromagnética y la gravitación. Aun así, la TCC tiene importantes predicciones de carácter muy general, que no dependen de la naturaleza de las interacciones concretas y que han sido verificadas hasta la fecha.

ANTIPARTÍCULAS

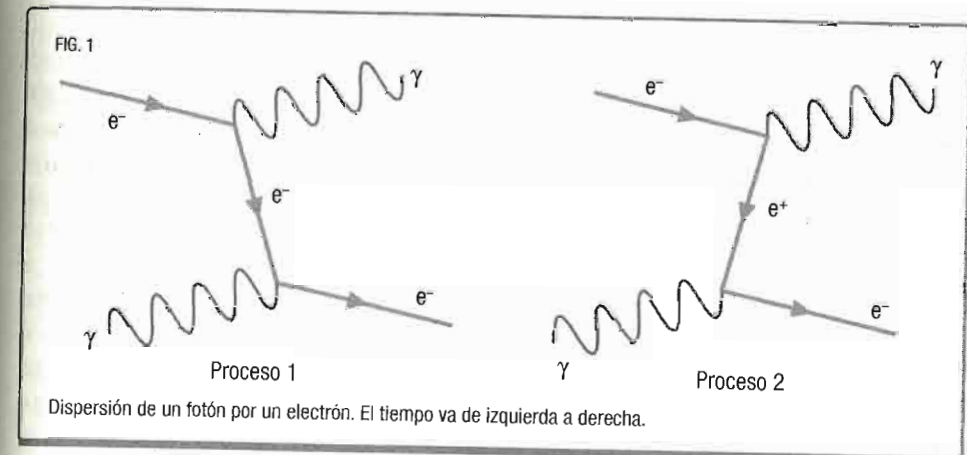
Consideremos que un observador ve cómo un fotón (γ) es absorbido por un electrón ($\gamma + e^- \rightarrow e^-$) y que luego este lo reemite ($e^- \rightarrow e^- + \gamma$) (proceso 1 en la figura 1). Esta es la forma en

que un fotón, y en definitiva la luz, se dispersa por un electrón. Sin embargo, hay observadores en movimiento que lo que ven es que un fotón es emitido antes de ser absorbido (proceso 2 en la figura 1). Una forma de que esta inversión cronológica no sea paradójica es asumir que en realidad los dos procesos ocurren de manera que todos los observadores ven lo mismo. El segundo proceso consiste en que el fotón genera un par positrón-electrón y que el positrón (e^+) se aniquila con el electrón (e^-). De esta forma, la carga se conserva en todo momento. El diagrama también sugiere que un e^+ es un e^- viajando hacia atrás en el tiempo. Todo esto fue idea de Richard Feynman y por ello a esos diagramas se les llama *diagramas de Feynman*. No solo ayudan a visualizar el proceso de forma espacio-temporal sino que Feynman los convirtió en un sofisticado método de cálculo para establecer la probabilidad de que ocurra un determinado proceso.

El análisis de datos experimentales comprueba que estos procesos, puras predicciones de la TCC, realmente se observan en el laboratorio más allá de cualquier duda razonable. Además, el positrón fue descubierto por Carl David Anderson en 1932, mediante análisis de rayos cósmicos.

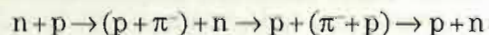
No importa lo bella que sea tu teoría ni lo listo que seas; si no explica el experimento, está mal.

RICHARD FEYNMAN

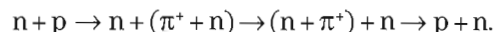


FUERZAS DE INTERCAMBIO

La TCC prevé que todas las interacciones pueden entenderse a través del fenómeno de *intercambio de partículas*. Por ejemplo, supongamos que un observador ve que un protón se transforma en un neutrón y un pión positivo, $p \rightarrow \pi^+ + n$, y que ese pión es atrapado después por un neutrón que se convierte por tanto en un protón (figura 2), $\pi^+ + n \rightarrow p$. Si no nos fijamos en el pión, lo que veremos será un protón que choca contra un neutrón, produciendo otro protón y otro neutrón,

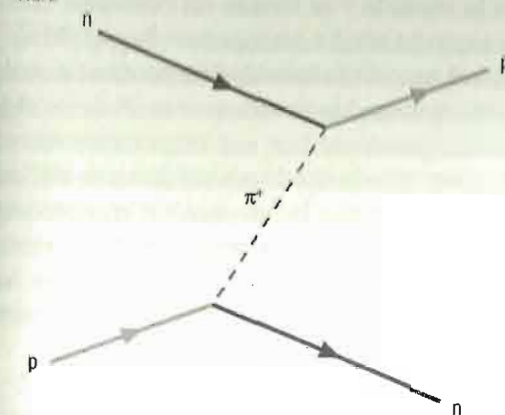


es decir, una colisión protón-neutrón. Hay observadores en movimiento relativo que ven en principio algo cronológicamente distinto: un pión que es absorbido por el neutrón para después ser emitido por el protón. En realidad, el segundo pión viaja hacia el pasado, y por tanto es equivalente a una carga opuesta viajando hacia el futuro. O sea, que podemos interpretar el segundo proceso como un neutrón que emite un pión negativo y un protón, $n \rightarrow \pi^- + p$, a continuación de lo cual ese pión es absorbido por el protón para crear un neutrón (figura 3), $\pi^- + p \rightarrow n$,



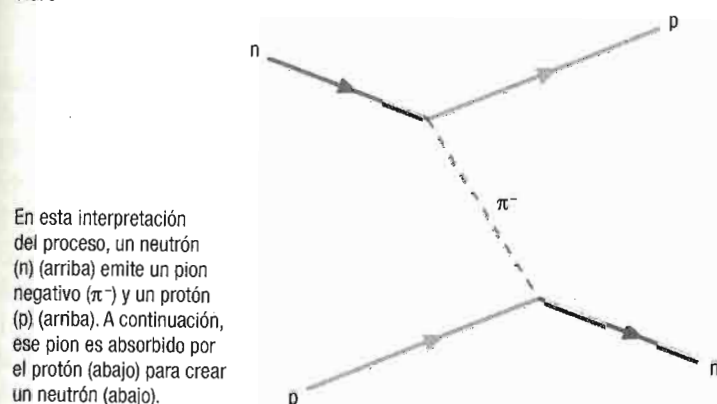
En resumen, la información que ambos observadores ven es la misma en total, el protón y el neutrón intercambian tanto un pión positivo como uno negativo. Esta no es la única forma en que pueden interaccionar un protón y un neutrón; también pueden intercambiar un pión neutro, pero en este caso no hay contradicción, él es su propia antipartícula. Este argumento también resuelve el misterio de por qué dos neutrones o dos protones interactúan; se intercambia un pión neutro. Todo esto está muy bien salvo por un pequeño detalle: la energía y el momento no se conservan en el proceso. Es aquí donde entra la mecánica cuántica, dado que de acuerdo con el principio de indeterminación podemos violar la ley de la conservación de la

FIG. 2



En esta interpretación del proceso, un protón (p) se transforma en un neutrón (n) y un pión positivo (π^+). Ese pión es atrapado después por un neutrón (arriba) que se convierte por tanto en un protón (arriba).

FIG. 3



En esta interpretación del proceso, un neutrón (n) (arriba) emite un pión negativo (π^-) y un protón (p) (arriba). A continuación, ese pión es absorbido por el protón (abajo) para crear un neutrón (abajo).

energía en ΔE y del momento en Δp durante un tiempo Δt y en un espacio Δx lo bastante cortos, respectivamente. Los estados intermedios, donde los piones son intercambiados, no pueden por tanto ser observados y es por ello que se llaman *estados virtuales*.

Una forma de entender las fuerzas de intercambio es imaginar que un jugador de baloncesto le pasa la pelota a otro situado de frente; al hacerlo, el primero retrocede y hace retroceder al receptor. De este modo conseguimos una interacción repulsiva, ya

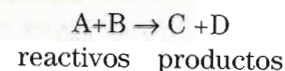
que se separan. Una interacción atractiva se consigue si suponemos que ambos se dan la espalda y se lanzan un bumerán: tanto el que lo lanza como el que lo recibe retroceden de espaldas, y por tanto se acercan. En el caso de la interacción protón-neutrón anterior (figuras 2 y 3) el intercambio protón por neutrón es algo así como intercambiarse la camiseta con sus respectivos dorsales. De este modo, la interacción de Coulomb eléctrica se entiende como el intercambio de un fotón; la interacción gravitatoria, como el intercambio de un gravitón; la interacción débil, como el intercambio de un mesón W, y la interacción fuerte entre hadrones, como el intercambio de un pion. La interacción fuerte entre quarks se produce por intercambio de gluones.

ESPÍN

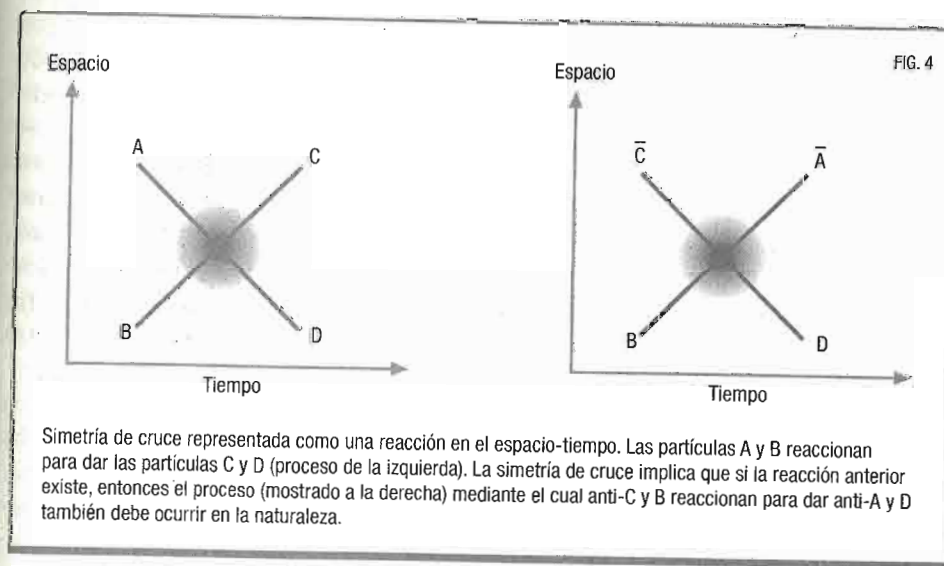
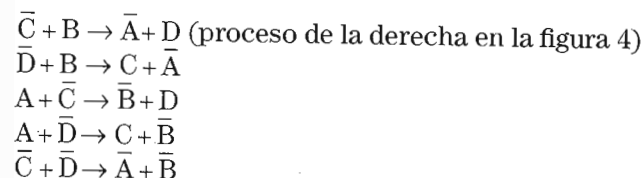
Uno de los resultados más espectaculares de la TCC es que puede asociarse el cumplimiento o no del principio de exclusión de Pauli con una propiedad de giro intrínseca que se llama *espín*. Podemos imaginar las partículas con espín como unas flechitas, en lugar de como pequeñas bolitas. El espín, al igual que la energía, también está cuantizado. En realidad todos los giros están cuantizados. Podemos filtrar la luz para hacer que la onda electromagnética oscile en una dirección fija del mismo modo que un puñado de agujas de coser orientadas al azar atraviesan una red de hilos tensados paralelamente solo cuando están alineadas. El fotón, por ejemplo, tiene espín uno y dos estados correspondientes a la luz polarizada. Cuando un fotón circularmente polarizado incide sobre una superficie oscura, esta gira con una unidad de momento angular. La TCC no solo prevé la existencia de antipartículas sino que relaciona el espín con las propiedades estadísticas de las partículas. El *teorema de conexión espín-estadística* nos dice que dos partículas que tengan espín entero pueden estar en el mismo estado cuántico, mientras que aquellas que lo tienen semientero están sujetas al principio de exclusión de Pauli, es decir, que no pueden compartir el mismo estado cuántico.

REACCIONES CRUZADAS

Una de las propiedades más notables de la teoría cuántica de campos es la llamada *simetría de cruce* y se refiere a las leyes que gobiernan las reacciones entre partículas. Las colisiones entre partículas elementales las podemos imaginar como reacciones químicas. En una reacción entre dos partículas A y B que producen C y D (proceso de la izquierda en la figura 4) la expresamos así,



Entonces si \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} y \bar{D} son las correspondientes antipartículas, las siguientes reacciones también han de ocurrir en la naturaleza:



Estas propiedades nos recuerdan cómo tratamos las ecuaciones matemáticas del tipo $a+b=c+d$. Si restamos c en ambos miembros, la ecuación equivalente es: $a+b-c=d$, y si ahora restamos b en ambos miembros, tendremos: $a-c=d-b$, que es equivalente a la ecuación inicial $a+b=c+d$. Si identificamos las antipartículas con el signo negativo, podemos constatar la analogía con la simetría de cruce. Lo interesante de estas relaciones es que permiten, además, calcular las tasas de una reacción cruzada a partir de una única tasa de reacción. Pero no hay que dejarse llevar por la euforia; aunque nadie duda de esto, el problema es que se requiere saber una tasa de reacción en todas las condiciones imaginables, y el mero cálculo de una de ellas es sumamente complicado. En su lugar se usan los datos experimentales y se predicen los resultados de otros experimentos. Con todo, la simetría de cruce ha permitido batir un récord de precisión teórica sobre la experimental, único caso conocido en la interacción fuerte en el estudio de las colisiones entre piones.

Además, de la reacción $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$ (dispersión de fotones por electrones) se deduce la reacción $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ (aniquilación electrón-positrón para dar fotones) pero también su reacción inversa $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$ (creación de un par electrón-positrón por dispersión de luz por luz). Lo más impactante es el hecho de que la luz se disperse por luz en el vacío mediante el proceso

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Es decir, ¡la luz se tapa a sí misma! Este es un efecto cuántico que la teoría del electromagnetismo clásico de Maxwell no predecía, y que de hecho representa una desviación del principio de superposición de las ondas electromagnéticas. La *dispersión luz-luz* se parece a la colisión de dos tsunamis en el océano y ambas se han observado.

EL VACÍO FÍSICO

La teoría cuántica de campos prevé una estructura nada trivial para el vacío, que solo emerge cuando lo polarizamos con luz o

con cargas mediante pequeñas fluctuaciones. En este sentido, el vacío se comporta más bien como un medio material. Nada que ver con el aburrido vacío clásico. Por ejemplo, si el vacío está lleno de electrones y positrones por igual su carga total es cero. Cuando ponemos una carga, como un protón, en el espacio, se produce el fenómeno de *apantallamiento de Debye* del plasma o los electrolitos, es decir, se rodea de pares dipolares de electrones y positrones que tapan su carga y modifican por efectos cuánticos la ley de Coulomb. Estos efectos han sido verificados experimentalmente y son la base para calentar el vacío.

FUERZAS Y PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

Al igual que las leyes de la química representan la sistematización de muchos de los hallazgos de los antiguos alquimistas durante siglos, la síntesis actual de las partículas elementales y sus interacciones son el resumen de observaciones experimentales sustentadas por principios teóricos y leyes de conservación. Esta síntesis pretende explicar la «alquimia» hadrónica y leptónica con más de 3000 estados descritos y avistados en el laboratorio.

Una ley de conservación importante corresponde a la carga eléctrica, dado que no se ha observado ningún proceso donde haya un cambio de carga neta. En cambio, la ley de conservación de la masa, tan útil y precisa en las reacciones químicas, deja de serlo en las reacciones nucleares, donde masa y calor son distintas manifestaciones de la energía que es conservada. Por ejemplo, si en un proceso electromagnético creamos un positrón, necesariamente hemos de crear un electrón, o sea, la generación se hace por pares electrón-positrón para conservar la carga, y la energía del fotón se transforma en la masa de ese par.

Una división importante se refiere a si las partículas atienden o no al principio de exclusión de Pauli, es decir, si dos partículas idénticas pueden compartir el mismo estado cuántico. Los fermiones obedecen el principio de exclusión mientras que los bosones no. Además, se ha observado que el número de fermiones se conserva, mientras que el número de bosones puede cambiar

Si pudiera recordar el nombre de todas esas partículas sería botánico.

ENRICO FERMI

en una reacción. A partir de ahí, la clasificación de las partículas puede hacerse siguiendo un esquema que nos recuerda a las claves dicotómicas en biología. Así, el electrón es un fermión, mientras que el fotón es un bosón. En la actualidad se conocen cuatro tipos de fuerzas fundamentales en la naturaleza: la fuerza gra-

vitatoria, la fuerza electromagnética, la fuerza *nuclear fuerte* y la fuerza *nuclear débil*. La fuerza gravitatoria (interacción gravitatoria) es atractiva entre masas y explica el movimiento de los planetas y astros así como la gravedad a la que estamos sometidos

en la Tierra. La fuerza electromagnética (interacción electromagnética) da cuenta de cómo las partículas con carga se atraen o repelen dependiendo de si las cargas son de distinto o igual signo, y es la que explica la estructura y la cohesión de la materia formada por electrones y núcleos atómicos. La fuerza nuclear fuerte (interacción nuclear fuerte) garantiza la existencia y compactación de los núcleos atómicos. Finalmente, la fuerza nuclear débil (interacción nuclear débil) explica cómo tres especies de neutrinos se crean o destruyen en espacios reducidísimos para provocar la desintegración de los núcleos atómicos.

No todas las partículas que se observan en el laboratorio sienten todas las fuerzas, ni todas son elementales o indivisibles. Recíprocamente, no todas las partículas que existen se observan directamente en el laboratorio. La clasificación actual atiende a si las partículas elementales sienten o no la fuerza fuerte. Las que sienten la interacción fuerte se denominan quarks, mientras que aquellas que no la sienten, como los electrones, los muones y los neutrinos, se llaman *leptones*. La justificación de esta división es que el número de leptones y el número de quarks se conservan en cualquier proceso. Los quarks solo se observan en múltiplos de tres, de forma que se define el número bariónico como un tercio del número de quarks. Todas estas partículas tienen sus antipartículas y sus números leptónico y bariónico son negativos. Existen seis especies de quarks (u, d, s, c, b, t), y tres especies de neutrinos asociados respectivamente con el

electrón (neutrino electrónico), el muon (neutrino muónico) y el tauón (o tau) (neutrino tauónico).

En el modelo actual todas las interacciones entre partículas elementales corresponden al intercambio de partículas prescrito por la teoría cuántica de campos. Así, las partículas masivas intercambian gravitones, las partículas cargadas intercambian fotones, los quarks intercambian gluones y los leptones intercambian bosones cargados W o neutros Z. Las partículas que sí se ven en el laboratorio y que sienten la interacción nuclear fuerte son los hadrones, que son partículas compuestas por quarks y/o antiquarks, y muchos de ellos son inestables, es decir, que se desintegran por medio de las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles. Sin embargo el número de hadrones no se conserva. Los bariones tienen número bariónico uno y por tanto el número neto de quarks que tienen es tres. Los mesones tienen número bariónico cero, por lo que están formados por un quark y un antiquark. En los procesos causados por la interacción nuclear fuerte, los quarks u, d, s, c, b, t se reordenan entre sí pero no cambian su especie, mientras que en los procesos causados por la interacción nuclear débil se pueden producir transmutaciones entre las especies de quarks ayudados por los leptones. Por ejemplo, la composición de quarks en el protón es $p = uud$, mientras que la del neutrón es $n = udd$. En el espacio libre, el neutrón es inestable y solo vive durante un cuarto de hora. La desintegración beta del neutrón es $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, que corresponde a la desintegración beta del quark $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$.

LA ESTRUCTURA GRANULADA DE LA MATERIA

Pero si la materia está formada por átomos, ¿por qué no vemos su estructura granulada? En su novela *La función delta*, una autora española, Rosa Montero, relata una relación de pareja con un matemático donde se comparan los sentimientos con la *función delta*: valen infinito en un instante muy corto y cero en todos los demás. La función delta fue introducida por Paul Dirac para caracterizar la densidad de una partícula puntual. Los núcleos

atómicos no son puntuales, pero a escalas atómicas son tremendamente parecidos a la función delta. Ahora bien, cuando observamos un trozo de materia, digamos con luz visible, la longitud de onda correspondiente abarca miles de átomos. Por tanto, en lugar de ver una estructura accidentada como suma de funciones delta, lo que vemos en realidad es una forma promediada y con aspecto suave. Dicho carácter tremendamente irregular solo se pone de manifiesto cuando la longitud de onda es comparable al tamaño de los átomos, y esto corresponde a los rayos X.

Por otro lado, si la materia está formada por una infinidad de átomos, no parece sencillo estudiar el movimiento de $6 \cdot 10^{23}$ átomos o moléculas, sobre todo porque esperamos que choquen, ya que están muy apretados. Un grupo de 100 personas no tiene el mismo comportamiento en un vagón de metro en horas punta, donde apenas pueden ignorarse y hay que vigilar hasta la posición de los brazos, que en un espacio abierto donde cada cual campa a sus anchas.

La ventaja de tener teorías dinámicas fundamentales es que tratan de explicar todo con unos pocos principios básicos; hay que especificar qué partículas elementales intervienen y qué interacciones son las relevantes. No hay duda de que cualquier objeto macroscópico estará formado por una gran cantidad de trinitades de quarks correspondientes a un número bariónico y un número igualmente ingente de electrones igual al número de protones. A pesar de todo, las teorías fundamentales no son prácticas y en según qué situaciones conviene adoptar un punto de vista reduccionista y reformular el problema usando otras variables, como si tanto partículas como interacciones fuesen fundamentales. Esto requiere a veces un análisis minucioso de todas las escalas de longitud, tiempo y energía típicas.

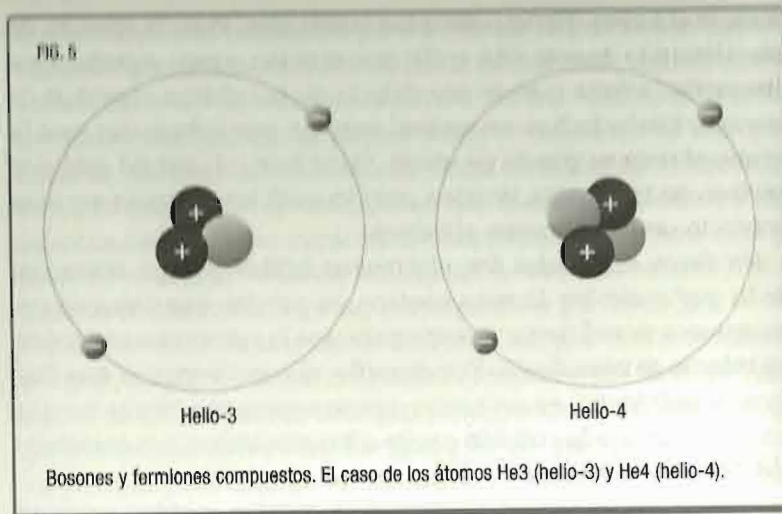
Veamos un ejemplo. El aire que respiramos consta en su mayor parte de oxígeno y nitrógeno, ambos en estado molecular, en unas proporciones aproximadas del 20% y el 79%, respectivamente. La temperatura ambiente de 27 °C, que corresponde a 300 K en la escala absoluta, corresponde a una energía media de 1/40 eV. Cuando dos moléculas de aire chocan con esa energía pueden hacerlo elásticamente o bien perder un poco de

energía al hacer vibrar o girar las moléculas. Pero la energía de vibración y la de rotación están cuantizadas, y esto significa que no pueden vibrar o girar por debajo de la mínima cantidad de energía. Es decir, hay un umbral mínimo por debajo del cual la excitación no se puede producir. Pues bien, el umbral está por encima de la energía térmica, con lo cual los choques en esas condiciones son siempre elásticos.

En física molecular los electrones brillan por su ausencia, dado que al ser los átomos neutros, es preciso que estos se encuentren con suficiente energía para que la estructura electrónica interna se manifieste. Por ejemplo, si consideramos dos átomos de hidrógeno, es necesario que se supere una cierta energía umbral para que la colisión excite a los electrones y el resultado sea un átomo excitado.

Aunque las partículas no sean elementales, pueden comportarse como tales bajo las condiciones de granulación, o sea, cuando las longitudes de onda involucradas superen su propio tamaño. Una propiedad importante es que en estas condiciones una partícula compuesta se comporta como un bosón o un fermión dependiendo de si el número de fermiones que contiene es par o impar. Los bariones son pues fermiones mientras que los mesones son bosones. Esta propiedad se puede extender también a núcleos y átomos. El átomo de hidrógeno, integrado por un protón y un electrón ($H=pe$) es un bosón. En cambio el átomo de deuterio, integrado por un protón, un neutrón y un electrón ($D=pne$) es un fermión. El núcleo de helio tiene dos isótopos cuyas composiciones son ppn para el caso del helio-3, que es un fermión, y ppnn para el caso del helio-4, que es un bosón (figura 5). Si formamos los respectivos átomos neutros añadiendo dos electrones en cada caso, no cambiaremos el carácter fermiónico del átomo del helio-3 (ppnee en esa composición hipotética) ni el carácter bosónico del átomo de helio-4 (ppnnee en tal composición hipotética). Sus propiedades macroscópicas a bajas temperaturas se reflejan en un estado condensado superfluido del segundo.

Sabemos que dos electrones interactúan intercambiando un fotón. Pero ¿cómo interactúan dos electrones que están en sen-



dos átomos de un gas? Por un lado, los átomos son neutros y no deberían experimentar interacción alguna. Sin embargo, esto contradice la experiencia, dado que hay una tendencia a la agregación que se pone de manifiesto una vez bajamos la temperatura lo suficiente como para que se produzca la condensación en la fase líquida. La respuesta está en la mecánica cuántica. En los átomos, la carga positiva está en el interior y la negativa en la superficie, una configuración que podemos imaginar con la forma de una rosquilla, de modo que en la dirección de acercamiento la rosquilla se deforma, generando un momento dipolar durante el tiempo en el que intercambien un fotón. Cuando dos átomos se acercan, uno de ellos emite un fotón virtual que excita a un electrón y luego decae reemitiendo otro fotón virtual que devuelve al átomo inicial. Este proceso conlleva el intercambio de dos fotones, y cuando Fritz London lo describió en 1930 produjo la ansiada interacción de fuerzas que Van der Waals había intuido, confirmando que dichas interacciones caen como la sexta potencia de la separación entre partículas. Pero la historia no acaba aquí. Más tarde se vio que estas fuerzas de Van der Waals eran inapropiadas para describir la interacción de partículas en suspensión coloidal, que se encuentran a distancias de nm, es

decir, entre 100 y 1000 veces más lejanas que las partículas en un gas. Hendrik Casimir y Dirk Polder en 1948 pensaron que a tales distancias la velocidad de la luz juega un papel importante dado que las transiciones electrónicas pueden ocurrir más rápidamente que el tiempo que tarda un fotón en cubrir la distancia entre los dos átomos. La interacción resultante decrece con la séptima potencia de la distancia, comportamiento corroborado por los experimentos. No deja de ser impresionante que la interacción de las partículas en un coloide como puede ser la mayonesa venga descrita por el intercambio de dos fotones que experimentan un retardo debido a que la velocidad de la luz no es infinita.

MATERIA BLANDA Y EXTREMA

¿Cómo interactúan dos hadrones? Intercambiando mesones. Las fuerzas que se ponen de manifiesto a nivel hadrónico son el análogo de las fuerzas de Van der Waals, pero es la fuerza nuclear fuerte la que se esconde tras estas fuerzas granuladas. Es lógico pensar que detrás de estados extremos de materia con altas temperaturas o densidades tengamos interacciones extremadamente intensas. La llamada materia blanda (polímeros, plásticos) se cementa con fuerzas de cohesión moleculares, que son especialmente poco intensas. En cambio, la interacción fuerte es particularmente intensa. Si tomamos la interacción entre dos protones a una distancia inferior a 1 fm, la fuerza fuerte es 10000 veces más intensa que la interacción eléctrica. La interacción gravitatoria es realmente ínfima.

Densidades extremas

La materia tiene en condiciones normales un cierto grado de concentración, pero sus constituyentes más densos son los neutrones y los protones. El estado de mayor densidad posible se consigue poniendo un neutrón junto a otro, y solo es varias veces más denso que el interior de los núcleos atómicos.

La materia que está formada por protones, neutrones y electrones no solo es estable sino que se resiste a ser comprimida excesivamente, al menos si la presión no es brutal. Pero si los electrones y los protones se atraen por interacción eléctrica, ¿no podríamos ganar energía juntando cada electrón con un protón sin límite hasta que estén lo más juntos posible? La Luna y la Tierra, que se atraen por la interacción gravitatoria siguiendo la misma ley de distancias, no caen a plomo una sobre otra debido al movimiento de giro, ya que este proporciona una aceleración centrífuga que contrarresta la acción de la gravedad. En el caso de los átomos, incluso aunque no existiese esa rotación, el principio de incertidumbre impide que el electrón se precipite sobre el protón; si está muy cerca, irá muy rápido aumentando la energía. Se limita así el máximo acercamiento posible compatible con la mínima energía, y eso nos da el tamaño del átomo más pequeño imaginable, el átomo de hidrógeno. A partir de ahí, para construir elementos más pesados con más protones solo queda ir añadiendo tantos electrones como protones. Entonces entra en funcionamiento el principio de exclusión de Pauli para los electrones. Esta sencilla construcción genera la tabla periódica

de los elementos que Dmitri I. Mendeléyev propuso en sus *Principios de química* en 1869.

MATERIA CONCENTRADA

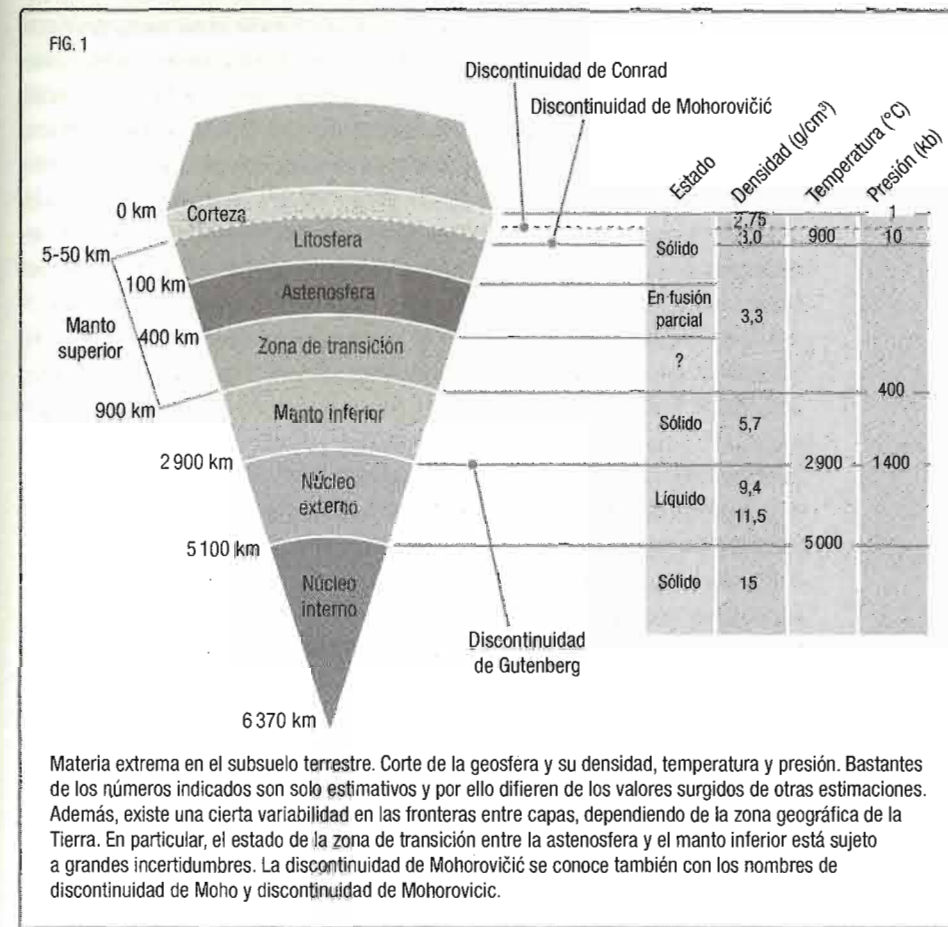
La densidad de los sólidos es típicamente de gramos por centímetro cúbico, mientras que la de los gases se mide en gramos por litro, una densidad 1000 veces menor, o lo que es lo mismo, la separación entre partículas difiere por un factor 10 en cada dirección espacial ($10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$). La materia condensada está normalmente en un estado concentrado, aunque no el mayor posible, pero entre los más densos y los menos densos la diferencia no es excesivamente grande: entre el sodio y el osmio existe un factor 20 de diferencia. ¿Por qué? Los átomos, constituyentes de la materia, tienen tamaños parecidos, entre los más pequeños y los más grandes puede haber un factor de entre dos y tres. Normalmente, cuando el átomo es más pesado (recordemos que la masa se encuentra concentrada en el núcleo), también tenemos más electrones que están sujetos al principio de exclusión, así que tales átomos tienden a ser más grandes, y precisamente debido al principio de exclusión los electrones de distintos átomos se resistirán a la presión externa.

Sin embargo, si además de presionar el sistema lo calentamos, podemos por un lado conseguir que los electrones se encuentren en un estado totalmente ionizado y por otro que el sistema sea más denso que la materia ordinaria. La imagen es la de un plasma de carga negativa que actúa de sustrato para los núcleos descarnados. A pesar de esta reordenación de estados, los electrones siguen ejerciendo de fermiones y se resistirán por todos los medios a estar demasiado cerca unos de otros. ¿Cómo los contenemos en un recipiente que no se haga trizas? Es como si ponemos hierro fundido en una cazuela de hierro: la cazuela también se funde y todo se desparra.

El interior de nuestro propio planeta Tierra nos hace pensar en sistemas donde la temperatura y la presión son altas (figura 1). Tal y como esperamos, la densidad aumenta, pero la materia

sigue siendo ordinaria. La geosfera no es el lugar para generar un plasma electrónico repleto de núcleos atómicos.

Una vez más, la naturaleza es más astuta. Las *enanas blancas* son un ejemplo de cómo conseguir esas condiciones, aunque la presión no viene de fuera sino de la propia gravedad que mantiene todo unido. Decíamos que la energía de Fermi es la energía máxima de un sistema de fermiones, pero cuando la densidad es muy alta, dicha energía empieza a ser cada vez mayor y muchos de los electrones empiezan a ir a velocidades comparables a la



velocidad de la luz. Para estas estrellas, que están en la última etapa de su vida después de haber sido gigantes rojas y haber expulsado al espacio buena parte de su materia, existe un límite que Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) estableció sobre cómo de grande puede ser su masa para que la cosa no vaya a mayores, que no es sino otra forma de aumentar la presión sobre la materia. Nuestro conocimiento experimental de la materia extremadamente densa no pasa por el laboratorio de física nuclear, sino por el observatorio astronómico y las teorías de evolución estelar.

Las enanas blancas y las *estrellas de neutrones* son, por así decirlo, las cenizas compactas de estrellas que ya han dejado de ejercer la fusión nuclear constante y a gran escala que las definía como estrellas. Esos son los destinos que aguardan a la mayoría de los núcleos estelares tras una vida de decenas a miles de millones de años. El final último de una estrella muy masiva puede ser un *agujero negro*, una región inaccesible del espacio-tiempo en la cual el cadáver estelar se precipita. Del agujero no puede salir nada, ni siquiera la luz.

MATERIA NUCLEAR

El tamaño aproximado de un átomo, 10^{-10} m, viene determinado por los electrones. En el centro de cada átomo tenemos el núcleo que es entre 10 000 y 100 000 veces más pequeño, aproximadamente 10^{-14} m como muy grande. Pero, aunque los núcleos atómicos son muy pequeños, su tamaño es lo bastante grande como para que los protones y neutrones quepan dentro de ellos. Dado que el neutrón y el protón tienen masas tremendamente similares (la diferencia es de un 0,1%), Heisenberg y Nicholas Kemmer propusieron tratarlos como dos estados de un único objeto, el *nucleón*. Las propiedades de este sistema con dos estados son matemáticamente idénticas a los dos estados de polarización del electrón con espín arriba y espín abajo. Por eso se dice que el nucleón tiene dos estados de isospín: arriba (protón) y abajo (neutrón). El interés de todo esto radica en la hipótesis

de que en ausencia de todas las interacciones que no sean la interacción fuerte, el isospín se conservaría. Por supuesto, no hay forma de desenchufar las interacciones débiles y electromagnéticas en la naturaleza, excepto sobre el papel o en nuestra imaginación. Desde un punto de vista más fundamental, teniendo en cuenta que el protón y el neutrón están formados por quarks, $p = uud$ y $n = udd$, esta situación ideal correspondería al caso de que las masas de los quarks u y d fuesen idénticas. En la práctica, la ley de conservación del isospín se cumple con la precisión del 1%, lo cual es de gran ayuda.

Al hilo de esta discusión, es interesante señalar que si pensamos que la diferencia entre el neutrón y el protón es solamente la carga eléctrica, podríamos pensar también que el protón debería ser más pesado que el neutrón, dado que la energía debida a una densidad de carga eléctrica positiva se repele. En realidad es justo al contrario, y esto es algo que encuentra una explicación natural en la imagen de los quarks, donde esperamos que exista una diferencia debida exclusivamente a la diferencia de masas de los quarks, es decir, $M_n - M_p = m_d - m_u$, y eso sugiere que el quark d es más pesado que el quark u . Esta «explicación» no dice por qué eso es así, y realmente no se sabe el origen de las masas de los quarks.

La primera estimación del radio de los núcleos fue llevada a cabo por Hans Geiger y Ernest Marsden en 1909, bajo la dirección de Ernest Rutherford. Dichos experimentos y otros posteriores sugerían que el volumen de un núcleo era proporcional al número másico A , de la forma $V = (1,8 \text{ fm})^3 A$. Esto es equivalente a una densidad constante, donde en promedio encontramos un nucleón separado del más cercano por 1,8 fm. Existen variantes del experimento de Rutherford, donde se bombardea el núcleo tanto con electrones como con neutrones. Esto permite reconstruir la localización espacial de protones y neutrones en el núcleo. En todos los casos, se observa que la densidad de los distintos núcleos es aproximadamente la misma.

Por otro lado, el propio nucleón tiene un tamaño que podemos estimar entre 0,9 y 1 fm. Esto nos dice ya que el grado de empaquetamiento de los nucleones en un núcleo es tal que entre dos

de ellos hay un espacio donde ¡cabría otro nucleón! Si comparamos la situación con la del agua en estado líquido veremos que la configuración es muy parecida: entre dos moléculas cabe otra molécula. Así que en cierto sentido podemos imaginar el núcleo como un líquido, dado que los propios nucleones pueden fluir entre sus intersticios.

Además, con esta información podemos ver que para agrupar los nucleones al máximo, es decir, tocándose entre ellos, hemos de reducir la distancia en las tres dimensiones espaciales a la mitad, lo que nos da una densidad $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ veces superior. Este es el estado de mayor densidad que podemos imaginar, que consiste en comprimir un átomo 10^5 veces su diámetro, es decir, reducir su volumen $10^5 \cdot 10^5 \cdot 10^5 = 10^{15}$ veces, o lo que es lo mismo, aumentar la densidad a 10^{15} g/cm^3 . Esto es algo así como comprimir el planeta Tierra en un metro cúbico. Como veremos, dicho estado existe en el interior de las estrellas de neutrones.

Por otro lado, los núcleos tienen otra propiedad, y es que al ser la fuerza nuclear de corto alcance, las interacciones solo afectan a las partículas que se encuentran más cerca y por tanto su energía de ligadura por partícula varía muy poco. Si no fuera por la fuerza eléctrica que limita el tamaño del núcleo debido a la repulsión entre protones y la fuerza débil que hace que los neutrones se desintegren, podríamos imaginar un sistema arbitrariamente grande y con esa densidad de partículas, donde poner o quitar una partícula cuesta siempre lo mismo.

Las gotas de agua líquida tienen precisamente esa propiedad, su densidad es constante aunque mucho menor pero, como ya hemos dicho, el grado de empaquetamiento de las moléculas de agua es el mismo que el de los nucleones en el núcleo. Además, la energía de evaporación de una molécula no depende del número de moléculas. Por eso, cuando el agua hierve a 100°C la temperatura no varía, sino que tenemos que comunicarles calor una a una. Debido a esta analogía, George Gamow (1904-1968) propugnó la idea de que el núcleo atómico se comporta como una gota líquida que podemos hacer crecer casi sin límite hasta formar los océanos, y evaporarla molécula a molécula cuando le damos un poco de calor. Los físicos nucleares bautizaron este

océano de nucleones como *materia nuclear*, que como tal no existe en la naturaleza, aunque el interior del núcleo de plomo se le parezca bastante. Su densidad es de un nucleón por cada 1,8 fm. En realidad, lo que tenemos es una gota cargada eléctricamente, lo cual le confiere un carácter especial; en algún momento cuando vayamos añadiendo nucleones, la gota en lugar de crecer tenderá a fragmentarse debido a la repulsión eléctrica en dos o más gotas más pequeñas. Y eso es justamente lo que ocurre en la fisión nuclear, proceso usado en las centrales nucleares actuales. Una gran cantidad de cálculos en física nuclear utilizan la imagen de la materia nuclear como una idea enormemente fructífera. Es el gas ideal de la física nuclear, y el núcleo de plomo, que es estable y esférico y contiene 82 protones y 208 nucleones, como se ha dicho, se le parece bastante. Si queremos tener una imagen vívida de este núcleo podemos imaginar un racimo de 208 uvas; 208 partículas pueden parecer pocas para llamarlo «materia», del mismo modo que 208 moléculas de agua pueden no ser una «gota». En realidad lo que importa es que en un determinado proceso físico se comporten como si fuesen materia, y esto puede ser a partir de $A = 12$, el núcleo de carbono.

Quise doctorarme en física experimental porque los físicos experimentales tenían su propia habitación donde podían colgar su abrigo, mientras que los físicos teóricos tenían que colgarlo en la entrada.

GEORGE GAMOW

MATERIA NEUTRÓNICA

La materia nuclear está formada por fermiones, de forma que para muchos de ellos podemos imaginarla como partículas en una trampa y ocupando los niveles accesibles siguiendo el principio de exclusión y de mínima energía. Sin embargo, si prescindimos de que los protones tienen carga, podríamos pensar que entonces podemos reemplazar protones por neutrones, y aunque sus masas son parecidas y sus interacciones también,

como sistema de muchas partículas su comportamiento es diferente. Mientras que protones y neutrones con sus dos estados de polarización pueden agruparse en cuartetos muy estables de partículas alfa, los neutrones solo pueden hacerlo por parejas que ni siquiera tienen estados ligados. Eso hace que un gas de neutrones se comporte de forma diferente a la materia nuclear; mientras que aquel tiende a expandirse, esta no lo hace.

Aparte de las simulaciones por ordenador que hacen los físicos nucleares, la materia neutrónica solo existe que sepamos en el interior de las estrellas de neutrones. Aunque su temperatura en la superficie puede ser de hasta medio millón de grados, a escala nuclear corresponde a unos 50 MeV (megaelectronvoltios), y esta baja rápidamente después de su formación.

Las estrellas de neutrones son cadáveres de estrellas muy pequeños y densos. Con un tamaño que puede ser del orden de los 10 km y una masa de una vez y media la del Sol, ejecutan un giro vertiginoso que típicamente es de varios cientos de vueltas por segundo, provocando una brutal fuerza centrífuga que solo es contrarrestada por una gravedad enorme. Su densidad corresponde a colocar un neutrón pegado al lado de otro. La estrella de neutrones se forma cuando un cuerpo estelar tiene varias veces la masa del Sol y su núcleo se derrumba sobre sí mismo en un proceso que incluye una explosión de *supernova*. Todo el material externo es expulsado, haciendo que se colapsen protones y electrones en el núcleo estelar, los cuales posteriormente se funden para producir neutrones y neutrinos. Sin embargo, los neutrones son fermiones, y el principio de exclusión de Pauli impide que todos ocupen el mismo lugar, y por tanto que el sistema sea arbitrariamente pequeño, limitando así la máxima densidad alcanzable.

Estas ideas surgieron de forma puramente teórica en los años 30, cuando los astrofísicos se preguntaban por estados exóticos de la materia. Chandrasekhar demostró que había una masa crítica por encima de la cual la gravedad hace que se colapse, produciendo una estrella de neutrones. La masa crítica es 1,5 veces la masa del Sol. Según una leyenda apócrifa, Lev Landau fue el precursor de la idea de la estrella de neutrones, algo imposible ya que la habría propuesto antes de que el neutrón fuera descu-

bierto por Chadwick en 1932; de hecho lo que propuso fue una suerte de núcleos gigantes formados por electrones y protones. La primera predicción de las estrellas de neutrones la hicieron en 1933 Walter Baade y Fritz Zwicky, quienes con una previsión admirable decían: «Con todas las reservas, proponemos que las supernovas representan la transición de estrellas ordinarias a estrellas de neutrones, que en sus estadios finales están formadas por neutrones compactados».

Como se ha mencionado, son unos objetos muy compactos, con un diámetro del orden de la decena de kilómetros, que generan efectos astrofísicos notables. La más importante de estas manifestaciones es la que hace que se denominen púlsares a las estrellas de neutrones con una clara actividad de ese tipo. Los púlsares fueron descubiertos en 1967 por una estudiante, Jocelyn Bell, aunque el premio Nobel recayó sobre su jefe, Antony Hewish, en 1974. Un púlsar es una estrella de neutrones en rotación que puede producir radiación haciendo girar rápidamente su enorme campo magnético a través del espacio. Por ejemplo, PSR 1937+21 emite 641 pulsos por segundo. La rotación tan rápida nos recuerda a las piruetas de una patinadora que puede regular su velocidad de giro a placer, sin más que extender o juntar sus brazos. Si pensamos en un faro que emite luz periódicamente, la velocidad de rotación no puede superar la velocidad de la luz, lo que implica que $c > 2\pi R/t$, siendo R el radio del faro y t el periodo de rotación, lo que a su vez nos dice que el objeto ha de ser más pequeño que 74 km. Sin embargo, este giro cuesta energía y la rotación se ralentiza y al final el campo magnético se hace imperceptible.

¿Existen sistemas más densos que la materia neutrónica? Actualmente hay varios candidatos entre los objetos estelares, aún no confirmados. Pero, una vez que los neutrones se encuentran pegados, la única forma de seguir comprimiendo el sistema es comprimiendo los propios neutrones, y eso dependerá de cómo reaccionen los quarks que constituyen su interior.

Este trabajo contiene muchas cosas nuevas e interesantes. Por desgracia, todo lo que es nuevo no es interesante, y todo lo que es interesante no es nuevo.

LEV LANDAU

EL INTERIOR DEL NUCLEÓN

Como hemos dicho, el estado de mayor densidad imaginable y en cierto modo indestructible es el protón. Podemos calentarlo, golpearlo y maltratarlo; a partir de un protón siempre saldrá algo que nos recuerde que estuvo ahí, como el gato de Cheshire de *Alicia en el país de las maravillas* deja su indeleble sonrisa allá donde esté. Por eso merece la pena que miremos con un poco más de detalle en su interior.

El color oculto de los quarks

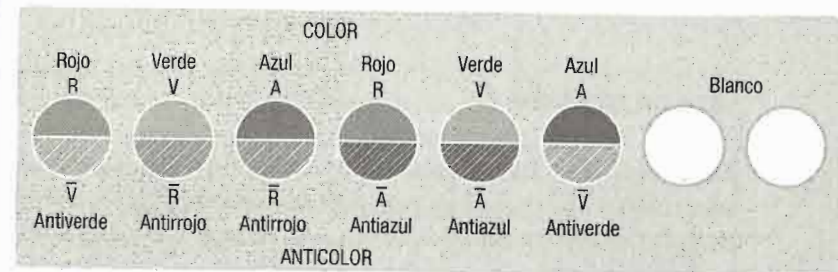
La mecánica cuántica garantiza una descripción completa del estado siempre, claro, que no existan variables ocultas. En una foto, por ejemplo, vemos la proyección bidimensional de objetos tridimensionales, pero la distancia a los mismos no es evidente. Nuestro cerebro la reconstruye con la visión estereográfica de nuestros dos ojos. De igual manera, el espín del electrón no se manifiesta explícitamente hasta que ponemos un campo magnético que separa los electrones cuyo momento dipolar apunta hacia arriba o hacia abajo. Dicho experimento, llevado a cabo por Otto Stern y Walther Gerlach en 1922, demostró que la imagen de los electrones como imanes diminutos es correcta. Pero existe otra forma de demostrar que el electrón tiene espín y es mediante el principio de exclusión de Pauli. Si concebimos el átomo como un conjunto de Z electrones en presencia de un núcleo de carga Z , el esquema de niveles que resulta obedece el patrón de ocupación típico de los fermiones, pero suponiendo que hay dos clases de electrón. Por ejemplo, el átomo de litio, que tiene $Z=3$, posee espín $1/2$ y se comporta como un fermión, acoge 3 electrones y su núcleo posee 3 protones y 3 neutrones.

Del mismo modo, los quarks tienen masa, carga, espín y *sabor*. Como tres quarks forman un nucleón (dos quarks u y un quark d integran el protón, en tanto que dos quarks d y un quark u constituyen el neutrón), que es un fermión, los quarks también son fermiones y están sujetos al principio de exclusión de Pauli. Pero

COLORES DE QUARKS Y SUS INTERACCIONES INTERCAMBIANDO GLUONES

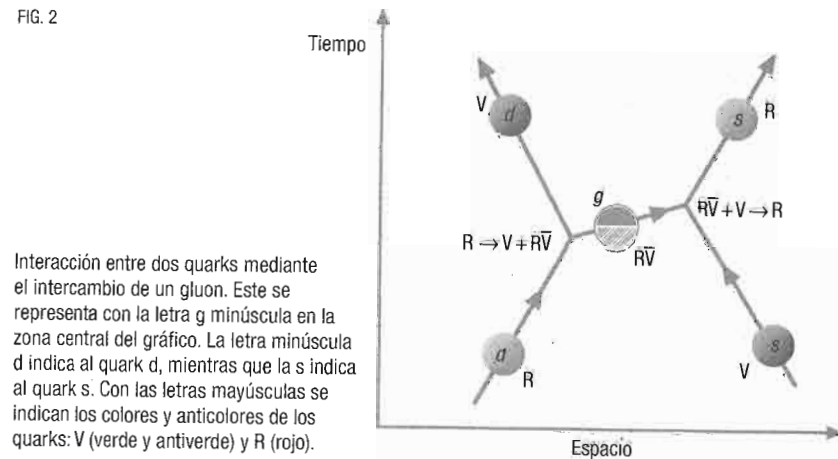
Newton demostró que la luz blanca oculta en realidad los colores del arcoíris, tanto mediante sus experimentos con prismas como con la rueda cromática. Además, esto le permitió formular la teoría del color, que básicamente permite reconstruir cualquier color a partir de unos pocos básicos, con distintas intensidades, algo que es de gran utilidad para los pintores. La idea es que cada tipo de quark, u , d , s , c , b , t , puede tener, además, un color: rojo (R), verde (V) y azul (A) (figura 1). Los quarks con diferente color se atraen entre sí, formando grupos de materia con distintos colores (figura 2). Los trozos de materia mínimos han de tener color blanco; que se obtiene con rojo+verde+azul=blanco. Los antiquarks tienen colores conjugados, antirrojo=verde+azul=cian; antiverde=rojo+azul=magenta, y antiazul=rojo+verde=amarillo. Los trozos de antimateria mínimos se forman con antiverde+antiazul+antirrojo=blanco.

FIG. 1



Estados de color y anticolor de los quarks.

FIG. 2

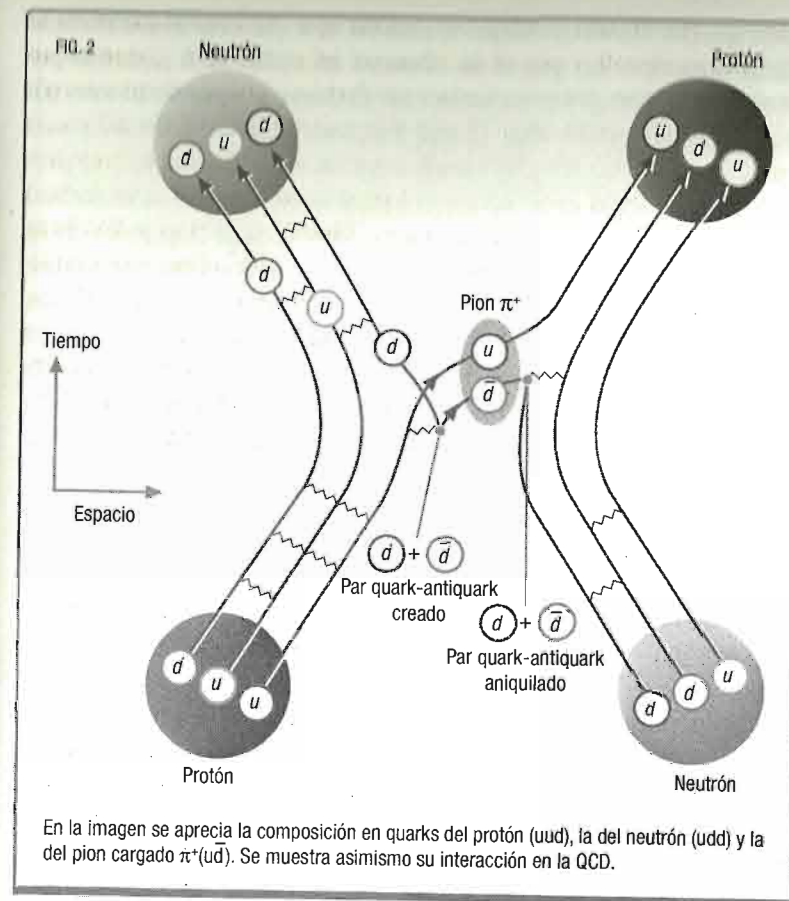


Interacción entre dos quarks mediante el intercambio de un gluón. Este se representa con la letra g minúscula en la zona central del gráfico. La letra minúscula d indica al quark d , mientras que la s indica al quark s . Con las letras mayúsculas se indican los colores y anticolors de los quarks: V (verde y antiverde) y R (rojo).

además, tienen una propiedad oculta, que se descubrió porque hay una partícula compuesta aunque efímera, la Δ^{++} , que tiene carga $+2$ y espín $3/2$ y ha de ser un fermión (espín semientero). Estará formada por tres quarks del tipo u (carga $2 = 2/3 + 2/3 + 2/3$) y cada uno de ellos con el mismo espín $+1/2$. Es decir, tres fermiones en un mismo estado, con lo que tendríamos una violación del principio de exclusión de Pauli. Moo-Young Han y Yoichiro Nambu propusieron una nueva propiedad, aparentemente oculta pero necesaria para salvaguardar el principio de exclusión de las partículas compuestas. Por analogía con la teoría de los colores de Newton, se ha convenido en llamar *color* a esa propiedad, según la propuesta de Gell-Mann. Aunque la analogía con el «color» de los quarks tiene sus límites, permite explicar algunas cosas.

Libertad asintótica

Ya dijimos que el experimento de Rutherford con electrones sobre protones a muy altas energías se corresponde con tres centros difusores de los electrones con cargas $2/3$, $2/3$ y $-1/3$ que se comportaban como partículas puntuales, independientes y libres. Feynman sospechaba correctamente que eran quarks pero para cubrirse las espaldas los llamó partones (las partículas que son parte). La propiedad de aparecer como partículas libres a altas energías, llamada *libertad asintótica*, dio la pista crucial para encontrar la teoría fundamental de las interacciones fuertes. Se sabe que existe una clase muy restringida de teorías cuánticas de campos renormalizables compatibles con esa propiedad, las llamadas *teorías de Yang-Mills no abelianas*. La actual cromodinámica cuántica es una clase muy particular de dichas teorías, que requieren, además de los quarks con color y sabor, otras ocho partículas de masa cero y espín 1 llamadas gluones, algo así como ocho tipos de fotones. A diferencia del fotón, los gluones interactúan entre sí por tríos y cuartetos. Además, los gluones pueden unirse para formar las llamadas *glubolas*, pero hasta la fecha no hay evidencias convincentes de que tales estados existan en la naturaleza. La interacción entre quarks con color se produce por



intercambio de gluones, que puede cambiar su color solamente. Entonces, la forma en que un protón y un neutrón interactúan es por el intercambio de un pión, algo vaticinado por Hideki Yukawa en 1935 (figura 2).

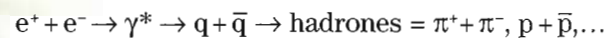
El confinamiento de los quarks

Durante algún tiempo, se pensó que los quarks podrían liberarse suministrando suficiente energía. Hasta la fecha, no se han obser-

vado quarks libres que dejen trazas en una cámara de niebla o de algún otro tipo. Lo que sí se observa en colisiones electrón-positrón es que se generan hadrones siempre y cuando la energía sea suficientemente alta. Como los hadrones más livianos son los piones, π^+ , π^- , π^0 , y la carga total ha de conservarse, el proceso más sencillo es $e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Por debajo de este umbral el único proceso posible es $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$. Por supuesto, si la energía aumenta entonces podemos crear más y más partículas, dado que disponemos de más energía para crear masa. Por tanto, este tipo de colisiones bombea mesones del vacío. Pero ¿cómo es posible que a partir de electrones y positrones que no sienten la interacción fuerte podamos crear partículas que sí la sientan? La explicación más sencilla es suponer que los piones forman parte del vacío, es decir, tenemos algo parecido a un medio acuoso. Cuando un electrón o un positrón irrumpen, los piones positivos y negativos se agrupan en torno a cada uno de ellos respectivamente, de forma que los empujan hacia fuera. El proceso es a través de un fotón virtual:



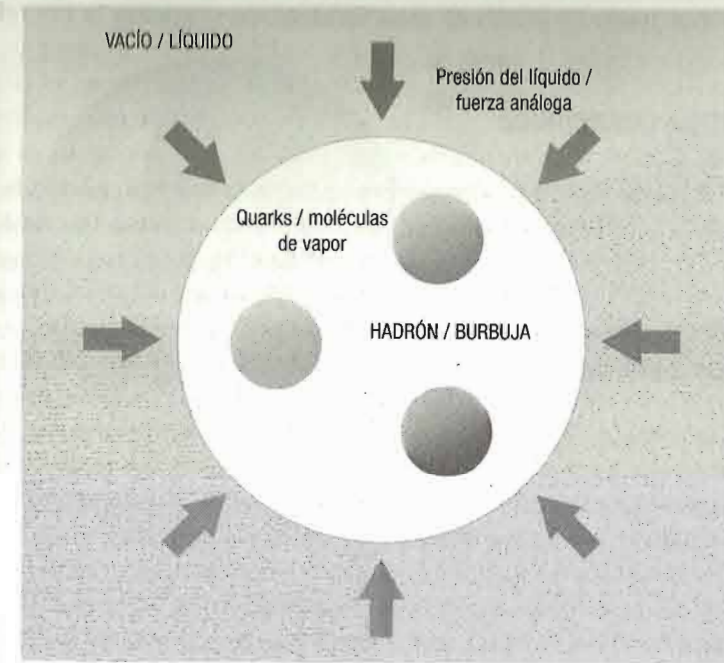
A medida que la energía del par aumenta y la longitud de onda de De Broglie disminuye, también aumenta el poder de resolución, tanto del electrón como del positrón, y la subestructura de los piones como pares quark-antiquark comienza a vislumbrarse. Por tanto, el proceso a nivel microscópico es el siguiente:



El vacío pues está lleno de pares quark-antiquark y por tanto siempre se producen por pares, del mismo modo que cuando partimos un imán con sus polos N y S tenemos dos imanes con sus polos N y S, y nunca polos aislados.

Existen muchos y convincentes argumentos en favor del confinamiento de los quarks dentro de los hadrones, y una imagen

FIG. 3



Una de las imágenes más populares para hacerse una idea del modelo burbuja del nucleón consiste en asimilar el vacío con un líquido y los hadrones como burbujas en cuyo interior los quarks se mueven con total libertad y rebotan contra las paredes. Si calentamos el líquido, podremos crear burbujas de vapor de agua que se evaporan y existen como vapor solamente en el interior de la burbuja. Si una molécula de vapor vuelve al líquido, deja de ser vapor y su comportamiento como partícula cesa. Los quarks que están en el interior del hadrón están localizados y por tanto adquieren un momento mínimo que al golpear las paredes genera una presión contra las mismas. El líquido presiona por su parte y el tamaño del hadrón se corresponde con un equilibrio entre ambas presiones. El modelo de la burbuja tiene el inconveniente de que si juntamos dos de ellas estas tienden a unirse en una burbuja mayor, pero con todos los quarks dentro. Finalmente, la materia de quarks sería algo así como una descomunal burbuja.

útil la proporciona el modelo burbuja (figura 3). Desde un punto de vista matemático, no existe ninguna demostración rigurosa de que esto sea realmente así. El problema teórico es tan acuciante que el Instituto Clay de Matemáticas lo ha incluido en la

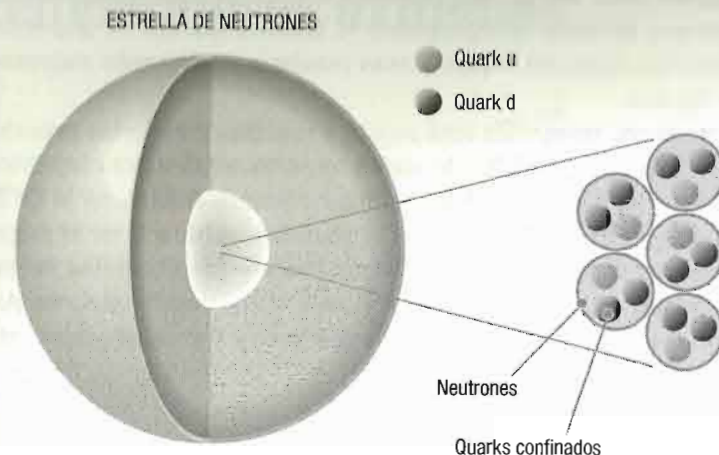
lista de los siete problemas matemáticos del milenio y ofrece un millón de dólares de recompensa para el afortunado que lo resuelva desde un punto de vista teórico.

MATERIA QUARKÓNICA

La libertad asintótica sugiere que quizá sea posible un estado donde los quarks circulen libremente, una *materia quarkónica*. En una estrella de neutrones (figura 4), los quarks están confinados dentro de los neutrones, pero en un objeto teórico conocido como estrella de quarks (figura 5), los quarks gozarían de ese estado de libre circulación. Al ser fermiones podemos esperar que tal estado a temperatura cero se caracterice por una energía de Fermi que, recordemos, es la energía máxima del fermión. Este escenario, lejos de ser simplista, ha planteado una gran variedad de fases posibles, muchas de ellas inspiradas por analogía con otras situaciones exóticas pero bien estudiadas en sistemas de muchos fermiones, como son electrones en metales o nucleones en núcleos. Por ejemplo, la *superconductividad* de color, al igual que la superconductividad en metales o la superfluidez en helio, materia nuclear o gases atómicos ultrafríos, se basa en la existencia de una interacción atractiva entre fermiones que generan estructuras de pares pero con un comportamiento bosónico. Estas bipartículas tienden a formar un condensado de Bose-Einstein. Los llamados *pares de Cooper* para electrones posibilitaron a John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer la explicación en 1957 del fenómeno de la superconductividad, descubierta experimentalmente en 1911. Esta misma teoría permitió a Landau explicar la superfluidez del helio a bajas temperaturas, y a Arkady B. Migdal un fenómeno análogo en los núcleos atómicos. Son fenómenos distintos con las mismas matemáticas.

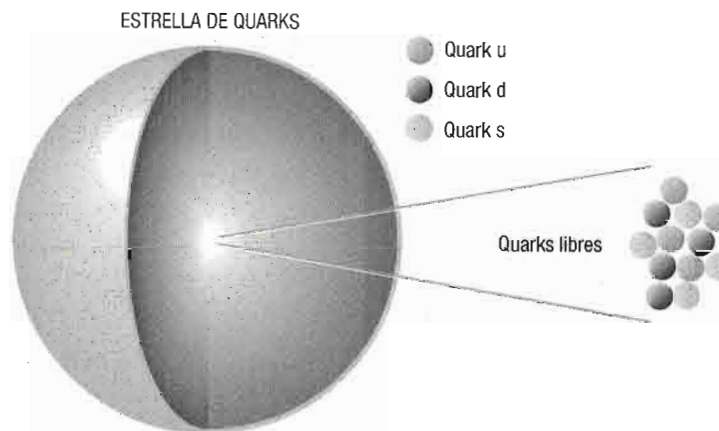
A todo esto hay que agregar la posibilidad, sugerida en 1971 por Arnold Bodmer y elaborada por Edward Witten en 1984, de que si se comprime la materia nuclear formada por protones y neutrones, que, recordemos, están compuestos por quarks de

FIG. 4



Composición de la materia en una estrella de neutrones.

FIG. 5



Composición de la materia en una estrella de quarks.

los tipos u y d, surja una nueva fase donde una fracción importante sean los quarks del tipo s. La razón es que las interacciones débiles, que permiten la transmutación de especies de quarks, admiten estados más masivos y por tanto mayores densidades.

Esta *terra incognita* está sujeta a muchas y variadas especulaciones, tanto por falta de datos experimentales concluyentes como por la incapacidad de realizar cálculos fiables en la QCD cuando la densidad de materia es ya comparable a la de la materia nuclear. Si la materia quarkónica existe en el interior de las estrellas de neutrones, con densidades cinco veces mayores que la que tiene la materia nuclear, estaríamos ante algo sugerente pero difícil de comprobar.

Temperaturas extremas

Cuando calentamos la materia podemos conseguir ionizarla parcial o totalmente hasta alcanzar el estado de plasma electromagnético. Este es un horno atómico donde se produce la nucleosíntesis estelar, pero un frigorífico nuclear comparado con el infierno de los primeros microsegundos del Big Bang, dominado por un plasma de quarks y gluones a dos billones de grados.

Ahora sabemos que el estado que llamamos *plasma* corresponde a la ionización de los átomos y a la liberación de electrones. Pero para los antiguos sabios griegos y hasta finales del siglo xvii, el fuego encarnaba la representación del llamado cuarto estado de la materia. La visión del fuego nos fascina e hipnotiza, entre otras cosas por la variabilidad cromática, algo que ocurre en general con todos los fenómenos relacionados con la ionización, las luces de neón, las auroras boreales, el relámpago... La belleza cromática que impregna las imágenes que nos vienen del espacio es una prueba manifiesta del espectro de emisión electromagnético generado por las transiciones de los electrones en los átomos. Los castillos de fuegos artificiales buscan precisamente aquellas sustancias con el espectro de emisión deseado.

La forma más visible y cotidiana de producir la ionización es mediante una llama. Michael Faraday, en sus lecciones navideñas de la Royal Society, popularizó sus observaciones en *La historia química de una vela*, donde relataba las particularidades del fenómeno pensadas para una audiencia juvenil, y en particular el aumento de la conductividad eléctrica. Curiosamente, el

editor de la versión escrita, William Crookes, desarrolló posteriormente el tubo de rayos catódicos con el que Thomson descubrió e identificó al electrón.

Como sistemas neutros que son, los gases no conducen la electricidad. Al nivel del mar, el aire contiene 10^9 pares de iones y electrones por metro cúbico, originados por los rayos cósmicos que atraviesan la atmósfera terrestre, lo cual es nada comparado con las 10^{26} moléculas neutras. Aunque el aire no es conductor de la electricidad, el rayo es una descarga entre la tierra, que sí lo es, y las nubes, que también lo son, cuando la diferencia de potencial es tan grande como de 30 kV/cm. Sin embargo, cuando se aumenta la temperatura, la conductividad aumenta.

Los tipos y formas de plasmas son realmente muy variados, y la clasificación atiende a la temperatura y a la densidad. Esencialmente, toda la luz visible del espacio viene de las estrellas, que son plasmas con una temperatura tal que emiten fuertemente radiación en longitudes de onda visibles. Sin embargo, la mayoría de la materia ordinaria (llamada *bariónica* en cosmología) que existe en el universo se encuentra en forma de plasma, a menudo tan caliente que emite radiación principalmente en forma de rayos X. A pesar de ser el plasma tan abundante, hoy en día se acepta que alrededor del 96 % de la densidad de energía total en el universo no es plasma o cualquier otra forma de materia ordinaria, sino una combinación de materia oscura fría y energía oscura.

DESCARGAS GASEOSAS

Los experimentos básicos que sentaron las bases de la física del plasma son las descargas eléctricas en gases enrarecidos. A mediados del siglo XIX los científicos constataron que una chispa eléctrica entre dos electrodos en un tubo de vidrio parcialmente vaciado generaba no un rayo sino un resplandor brillante. A medida que se aumenta el grado de vacío y el aire se enrarece, tanto el color como la estructura luminosa se van alterando

hasta que todo el tubo brilla con una luz tenue verdosa. Según Crookes, se trataba de una fluorescencia del vidrio por rayos invisibles que emanaban del cátodo. Estos rayos catódicos corresponden a los actuales electrones. Posteriormente Eugen Goldstein descubrió los *rayos canales*, capaces de atravesar el cátodo del tubo de vacío, y que corresponden a partículas positivas, que se identifican como iones.

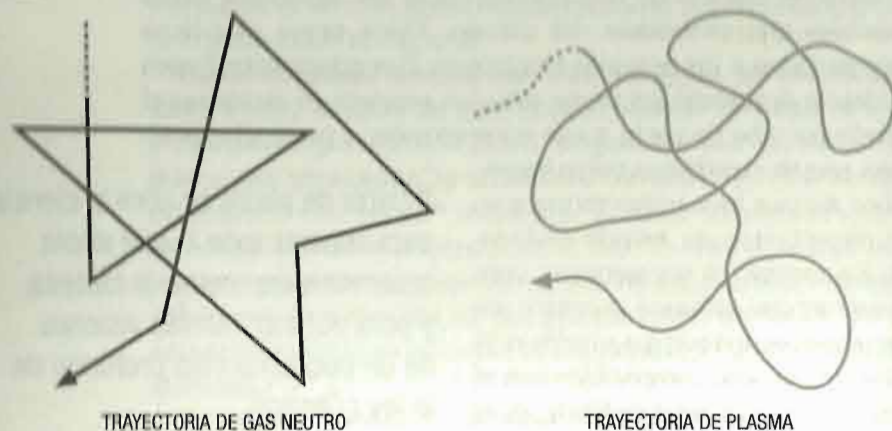
Los gases a baja temperatura suelen encontrarse en estado molecular. En cambio, a temperatura cero la estructura atómica consiste en electrones ocupando los niveles más bajos de energía, compatibles con el principio de exclusión de Pauli. En el caso del hidrógeno, solo tenemos un único electrón, lo que hace que todo sea más sencillo. Cuando subimos la temperatura, los átomos comienzan a excitarse y al final a ionizarse, liberando los electrones con carga negativa y dejando los iones positivos tras de sí. Esto hace que cuando calentemos un gas la electricidad circule más eficientemente, la conductividad aumente y por ende la resistencia baje. Conseguir un plasma totalmente ionizado es muy difícil en el laboratorio, dado que siempre hay una pequeña contaminación de átomos neutros tanto en su estado fundamental como en los posibles estados excitados que ensucian el plasma. El plasma se mantiene solo gracias a un aporte externo de energía, como puede ser un campo eléctrico, una llama, un láser o las reacciones nucleares. Sin estos suministros, el plasma se recombina rápidamente y «se cae». A efectos prácticos, un gas cuyas propiedades estén determinadas por la ionización de sus átomos se denomina plasma.

La baja densidad disminuye la frecuencia de colisiones y ralentiza por tanto la recombinación. Debido a la presencia de campos eléctricos, el movimiento de los electrones y de los iones en el plasma recuerda el movimiento browniano pero suavizado, dado que las trayectorias se curvan entre colisión y colisión (figura 1).

A partir de ahora se abre la ciencia para superar todo lo que ahora creemos saber sobre la materia y para obtener nuevas visiones de un esquema más profundo de la ley cósmica.

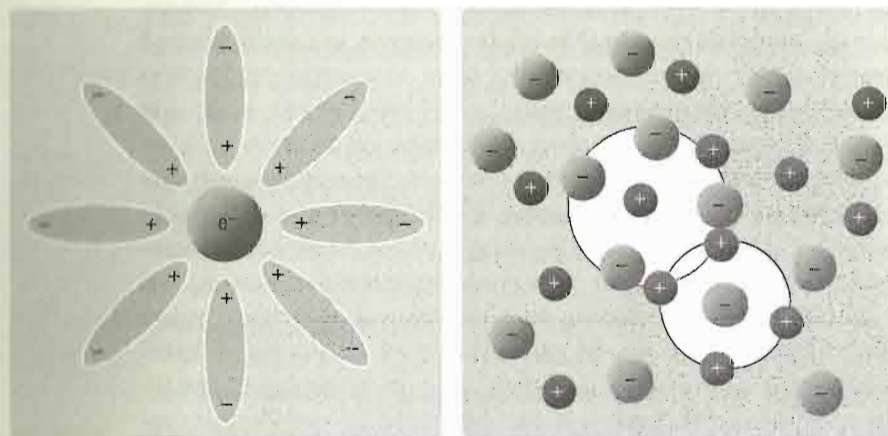
WILLIAM CROOKES

FIG. 1



Trayectorias típicas en un gas neutro (izquierda) y en un plasma (derecha).

FIG. 2



Apantallamiento de Debye. Cuando se coloca una carga eléctrica en un líquido polar como el agua (izquierda), dicha carga se rodea de los dipolos eléctricos de las moléculas. En un plasma (derecha), todos los electrones e iones vienen rodeados por cargas de signo opuesto dando lugar a una estructura organizada con una longitud característica que define células de neutralidad eléctrica.

PLASMA Y ELECTROLITOS

No es aconsejable subirse a un ascensor cuando venimos mojados de darnos un baño en la playa por el riesgo de recibir una descarga eléctrica. El agua pura o destilada no conduce la electricidad, son las sales disueltas en el agua marina las que lo hacen posible, los llamados *electrolitos*, hecho descubierto por Svante August Arrhenius. El físico neerlandés Peter Debye introdujo en la década de 1920 uno de los efectos más llamativos de los plasmas por su analogía con los electrolitos, como por ejemplo el apantallamiento que sufren las cargas en una solución salina como la sal común (NaCl , o cloruro sódico) disuelta en agua. Las moléculas de sal son eléctricamente neutras, pero la carga se encuentra distribuida de forma desigual. La zona del cloro tiene mayor concentración de carga negativa que la zona cercana al sodio. Por tanto, cuando ponemos la molécula en presencia de un campo eléctrico, la molécula se orienta en dirección paralela al campo. Por idéntico motivo, cuando ponemos una carga de un cierto signo, por ejemplo un electrón, este atrae a los iones de sal positivos que hacen de pantalla. Cuanto mayor sea el grado de ionización mayor será el apantallamiento (figura 2).

En el caso de un plasma, lo que tenemos son electrones e iones sueltos, pero el fenómeno de apantallamiento mutuo es el mismo. Por tanto, no hemos de imaginar un plasma como un continuo de partículas positivas y negativas entremezcladas sin más; el sistema se parece más a un conjunto de átomos de Debye neutros conteniendo tantos electrones como iones, cuyo tamaño depende de la densidad y de la temperatura del plasma. Esa *longitud de Debye* es una escala característica del plasma que marca la frontera entre fenómenos colectivos o individuales.

EQUILIBRIO COMPLETO

El plasma y el gas neutro no son tan fáciles de diferenciar mediante el diagrama de fases. De hecho, en el plasma existen al

menos dos componentes, los iones y los electrones, cada uno de los cuales tiene su presión, temperatura y densidad; así que el estudio de los plasmas se parece mucho al estudio de las disoluciones o de las mezclas en química. Cuando mezclamos agua caliente con agua fría a partes iguales obtenemos rápidamente agua templada cuya temperatura es la media.

Si se enuncia claramente un problema, deja de tener interés para el físico.

PETER DEBYE

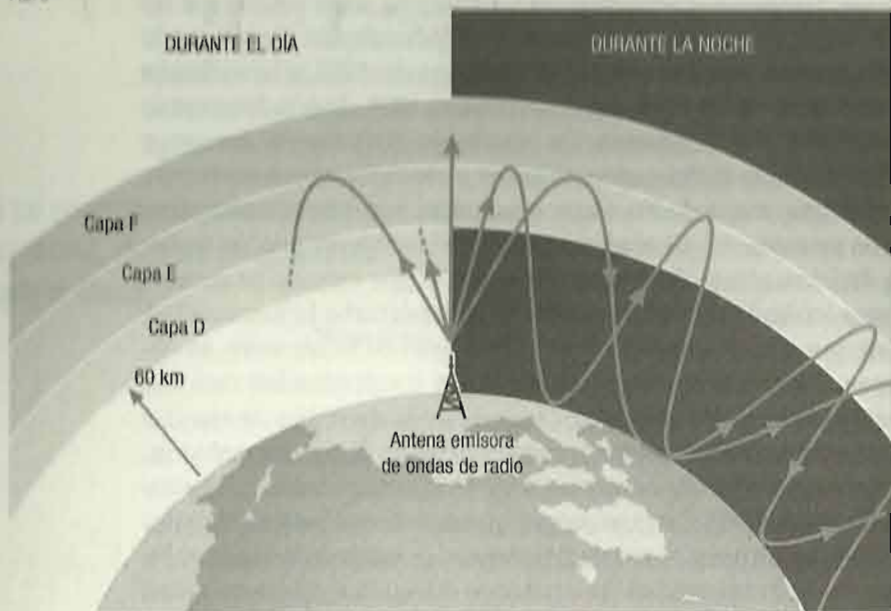
Decimos que el equilibrio es completo. Ahora bien, el equilibrio se consigue cuando la energía se redistribuye entre todas las partículas por igual. Por tanto, el mecanismo más eficiente para establecer el equilibrio es la transferencia rápida de energía mediante colisiones entre partículas. Si pensamos en dos bolas de billar idénticas, cuando una choca frontalmente contra otra en reposo, se transfiere el movimiento íntegramente de una a la otra. En el caso de que ambas choquen frontalmente yendo a la misma velocidad, salen despedidas hacia atrás también a la misma velocidad y no se transfieren movimiento. Estas fueron las observaciones que llevaron a Christiaan Huygens en 1673 a formular la *ley de conservación del momento lineal*.

En el plasma la situación es diferente. Los electrones, al ser más ligeros, se mueven en general mucho más rápido que los iones. Si pensamos en bolas de billar que hacen de iones y canicas que hacen de electrones, la canica rebota contra la bola de billar, que es muchísimo más pesada, y lo hace como si nada, o sea, cambia de dirección pero no se frena, y por tanto no transfiere casi ninguna energía. Así pues, el mecanismo de transferencia de energía y por tanto de equilibrio es mucho más eficiente entre partículas con igual masa que entre partículas con masas muy diferentes, como es el caso de los electrones y los iones. Por ello se suele hablar de un equilibrio incompleto, donde existen dos temperaturas diferentes. A la larga, por supuesto, todas las partículas tendrán una energía cinética parecida y habrá un equilibrio completo. El equilibrio incompleto le confiere al plasma la enorme ventaja de tener un fluido «caliente» de electrones junto con otro «frío» de iones.

OSCILACIONES DE PLASMA

La palabra plasma la introdujeron Irving Langmuir, el gran genio experimental y premio Nobel de Química de 1932, y Lewi Tonks a partir de sus primeros experimentos en 1926, donde detectaron las oscilaciones de plasma. Un plasma es globalmente neutro, y en promedio la distribución de iones y electrones será uniforme, pero la gran masa de los últimos ralentiza sus movimientos. Una de las primeras propiedades puestas de manifiesto por los trabajos de Langmuir y Tonks fue el hecho de que cuando se somete un gas ionizado a cualquier cambio que perturbe la neutralidad, como por ejemplo una diferencia de potencial localmente, se observan oscilaciones colectivas de carga longitudinales con una frecuencia característica que depende de la densidad de electrones. La sonda de Langmuir, consistente en un filamento que se introduce a modo de ánodo, recoge las cargas generadas en el plasma. Este es el método más simple, que determina las propiedades básicas del plasma, como su frecuencia, densidad y temperatura, a partir de la intensidad de corriente recogida cuando se aplica una determinada diferencia de potencial. Pero es intrusivo, es decir, puede afectar al propio plasma y tergiversar el diagnóstico.

Las oscilaciones de plasma tienen gran importancia en las capas altas de la atmósfera, como la ionosfera. Las ondas de radio que entran en resonancia con los electrones de la ionosfera no se propagan, sino que se reflejan permitiendo las comunicaciones intercontinentales a modo de espejo. La frecuencia del plasma depende de la temperatura, y eso marca una diferencia entre noche y día en las transmisiones, como vemos en la figura 3. Por la misma razón, cuando una nave espacial hace su reentrada en la atmósfera, procedente de la órbita terrestre o de una trayectoria interplanetaria, el inmenso calor desprendido por las colisiones con las moléculas de aire que provoca el rozamiento de su escudo de protección térmica genera una fina película de plasma que envuelve la nave y que bloquea completamente las comunicaciones con los astronautas durante los pocos minutos que dura la maniobra, impidiendo el contacto a través de radio en ambos sentidos.



Interacción de tres capas de la ionosfera con ondas de radio emitidas por una antena desde la superficie de la Tierra. La capa D, cuya acción entorpecedora se manifiesta solo de día porque está energizada por la radiación solar, intercepta ondas de radio de frecuencias muy usadas, impidiendo su propagación a gran distancia. De noche, con la influencia de tan solo las capas E y F, posibilitando condiciones más favorables, estas ondas de radio pueden rebotar y así llegar a zonas de la superficie terrestre más alejadas de la fuente de emisión.

ONDAS EN EL PLASMA

Las oscilaciones de carga del plasma pueden propagarse como ondas cuando la longitud de onda es menor que la longitud de Debye. Pero el plasma tiene propiedades insospechadas y caprichosas. Una de ellas, el llamado *amortiguamiento de Landau* predicho en 1946, es muy interesante, sobre todo porque fue una predicción teórica que no solo fue ampliamente cuestionada sino que solo se ratificó experimentalmente veinte años después. La historia se remonta a 1938, cuando Anatoli Vlávov encontró una ecuación que describía el movimiento de un plasma como un en-

jambre de electrones e iones que se desvían de sus trayectorias pero que nunca abandonan su órbita por una colisión. En teoría cinética se distingue entre desviaciones y colisiones. Si imaginamos un tablero sobre el que circulan bolas de billar cargadas positivamente (los iones) y canicas cargadas negativamente (electrones), podemos pensar que, debido a las interacciones eléctricas, las cargas opuestas se atraen y las cargas iguales se repelen, de forma que bolas y canicas empiezan a desviarse de forma suave si las distancias entre ellas no son muy cortas. En cambio, las veces en que se cruzan muy de cerca, sus cambios de trayectoria son más drásticos. Los choques violentos son los que a la larga propician que el plasma alcance el equilibrio, maximizando la distribución de energía del sistema. Pero, en general, el proceso es aleatorio, como en el movimiento browniano. Al igual que las moléculas en los gases, los electrones y los iones en el plasma no tienen siempre la misma velocidad, sino una distribución de posibles velocidades en torno a un cierto valor medio, que viene fijado por la temperatura.

La ecuación de Vlávov no tiene en cuenta el papel de las colisiones, pero presenta un problema cuando creamos ondas del plasma que se mueven a la velocidad de algunos electrones; la onda los catapulta de una forma incontrolada y su ecuación diverge. La razón de la divergencia tiene que ver con el fenómeno físico de la *resonancia* que muchos hemos utilizado para columpiar a alguien con unos pocos empujones. El columpio no es más que un péndulo que tiene una frecuencia de oscilación natural. Normalmente, si lo empujamos de forma descontrolada tardaremos mucho en conseguir que se eleve. Si por el contrario lo empujamos de forma acompasada con su movimiento de vaivén, enseguida logramos grandes oscilaciones. Esto es exactamente lo que ocurre con los electrones cuando son columpiados por una onda de tensión eléctrica oscilante. Vlávov solventó este percance recurriendo a las matemáticas disponibles. Básicamente lo que hacen es decir que por alguna oscura razón hay ondas con velocidades distribuidas simétricamente en torno a la velocidad de resonancia, pero esto no ayuda mucho a obtener un mejor conocimiento de la física implicada.

Landau propuso en 1946 solventar la singularidad desde un punto de vista físico, que en nuestro ejemplo del columpio es tener en cuenta el efecto del rozamiento, algo que para los electrones significa tener en cuenta las colisiones, y obtuvo el siguiente efecto: cuando los electrones son despedidos ¡la onda se cae! Esto es como cuando un surfista se sube en la cresta de la ola: para surfear es necesario que se dé un impulso inicial con la velocidad de la ola. Lo que dice Landau es que eso roba energía a esta última, y eso hace que la ola también se desmorone un poco.

Este es un ejemplo excelente donde se ve cómo los planteamientos matemáticos, aunque pulcros en sí mismos, pueden perder de vista los argumentos físicos subyacentes. El problema matemático no es desde luego nada sencillo, y han tenido que pasar setenta años para que se logre una demostración matemáticamente rigurosa del amortiguamiento de Landau, completada finalmente por Cédric Villani. Ello le valió la medalla Fields en 2010, el mayor galardón concedido por la comunidad matemática, algo así como el premio Nobel de Matemáticas.

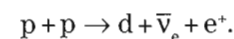
Otro efecto realmente impresionante en los plasmas, predicho teóricamente en 1967 y verificado poco después, son los «ecos *post mortem*». Si mandamos una onda al plasma, al cabo de un cierto rato transmitirá su energía a los electrones que resuenen con ella, de forma que terminará desvaneciéndose. Si después de esto mandamos otra onda al plasma, pasará lo mismo. Tras la calma, no esperamos que ocurra nada. En cambio, lo que sucede es que surge una señal que viene de la interferencia de las dos señales anteriores.

FUSIÓN NUCLEAR

El plasma electromagnético tiene muchísimas aplicaciones, pero quizá la más deseada es la posibilidad de obtener una fuente inagotable de energía, el gran problema que acucia cada vez más a la humanidad. Las temperaturas en las estrellas, siendo altísimas a escala humana, son extremadamente bajas a escala nuclear. Si la temperatura de 11 600 K se corresponde con 1 eV de energía,

la ionización está garantizada cuando la energía cinética de los átomos sea comparable a la energía de ligadura de los electrones. Para el átomo de hidrógeno se corresponde con centenares de miles de grados. En el interior del Sol, por ejemplo, la temperatura es de 15 millones de grados, que equivale a 11 KeV (kiloelectronvoltios). Esto es poquísimo comparado con la energía material de los núcleos, que es del orden de los GeV (gigaelectronvoltios). Las energías de ligadura de los protones y los nucleones a los núcleos son menores, unos pocos MeV (1 MeV = 1 000 KeV). Es como si tuviéramos átomos a una temperatura de menos de 1 kelvin, el imperio del frío donde casi toda la materia se encuentra en estado sólido. Así que podemos imaginar el interior del Sol como un horno para los átomos pero un frigorífico para los núcleos.

El proceso más sencillo donde se produce una fusión de núcleos «ultrafríos» es la unión de dos protones para dar deuterio, que es un estado ligado protón-neutrón,



Como reacción química, esta es una reacción exotérmica,



Una vez que se ha formado deuterio, podemos formar el siguiente núcleo, el tritio (compuesto de un protón y dos neutrones), mediante



Solo con esta reacción ya nos podemos hacer una idea de cuánta energía podemos generar. Normalmente hay mucha menos gasolina que agua, pero usando una reacción termonuclear podemos usar un litro de agua del océano, que contiene 0,003 g de tritio, y bombardearlo con 0,003 g de protones para generar la misma energía que la producida por la combustión de 300 litros de gasolina. Desde luego, es lo más parecido al cuerno de la abundancia que jamás se haya planteado, y de ahí el enconado

esfuerzo que se realiza desde hace medio siglo para imitar a la madre naturaleza. Como en las estrellas de neutrones, es la propia atracción gravitatoria la que mantiene al Sol unido, haciendo de paredes del horno. En la Tierra, el problema de las paredes es muy importante y se han ideado distintos procedimientos. El equipo del proyecto plurinacional ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) sigue trabajando en hacer viable comercialmente la generación artificial de energía mediante la fusión nuclear.

EL PLASMA HADRÓNICO

Un termostato permite regular la temperatura a placer, y se usa en diversos tipos de aparatos. Durante años prevaleció la idea de que no se podía calentar la materia hadrónica más allá de una temperatura límite, de unos dos billones de grados, lo que invitaba a pensar en la existencia de un termostato cósmico perfecto que no existe. Pero fue y sigue siendo una constante fuente de inspiración, impulsando investigaciones sobre el plasma de quarks y gluones, la teoría de cuerdas, y otras cuestiones.

Colisiones y producción de partículas

Cuando se acelera un solo protón por encima de 10 GeV, la forma de hacerlo chocar contra otro en reposo es disponer de un gas de átomos de hidrógeno. Un átomo de este tipo, como se ha dicho, contiene un protón y un electrón. La energía de ionización de 13,6 eV es unos mil millones de veces menor que 10 GeV, de forma que el efecto de ligadura es insignificante. Una forma de aumentar el rendimiento es acelerar tanto el proyectil como el blanco y hacerlos chocar uno contra otro, con lo cual la energía de colisión se duplicará. En una colisión protón-protón se producen numerosas partículas. El protón tiene un tamaño de 1 fm, y podemos imaginarlo como una esferita. Si las energías son altas o, lo que es lo mismo, la velocidad es cercana a la de

la luz, se produce en primer lugar la contracción de Lorentz de los protones en la dirección del movimiento, que viene dada por su masa dividida por su energía. Así, para 10 GeV la velocidad es 0,996 veces la velocidad de la luz y el protón se aplana para tener 0,09 fm. Para 10 TeV, el tamaño longitudinal es 1 000 veces menor. En la dirección transversal a la colisión, la forma esférica se mantiene, de forma que veremos dos discos chocando uno contra otro. Si miramos la colisión a lo largo del eje veremos que si los discos se solapan se produce una colisión y si no lo hacen no se produce. El grado de solapamiento es la superficie transversal común y corresponde a la sección eficaz.

Este concepto visual de la colisión inspiró a Enrico Fermi un modelo estadístico en 1950. Cuando dos protones chocan inelásticamente, la energía se deposita en un volumen muy pequeño, alcanzándose una gran densidad de energía.

La probabilidad de producir un determinado número de partículas a partir de esta energía es proporcional al número de estados accesibles. Posteriormente Landau propugnó una visión hidrodinámica, donde se produce la expansión de la materia antes de que se emitan los hadrones. Dado que la energía es muy alta, Landau supuso que la expansión se producía principalmente en la dirección longitudinal. Sin embargo, la visión de este no incluye un aspecto relevante: las partículas más rápidas se producen después y más lejos del foco de la colisión que las más lentas. Feynman, por su parte, propuso que el proceso de producción de partículas puede asimilarse a una ola gigantesca que se produce en el espacio de sucesos equivalentes. Es decir, el frente de onda no es plano sino que se curva para que la expansión vista desde cualquier observador en movimiento tenga el mismo aspecto.

Contando las masas de los hadrones

La acumulación de datos experimentales contando partículas elementales desde que Yukawa predijo la existencia del pion hasta nuestros días, se resume en el libro del Grupo de Datos de Partículas (*Particle Data Group*, abreviado PDG), apodado

por algunos «la Biblia de las partículas», tanto por su importancia como por sus muchas páginas: ¡la edición impresa de 2015 tiene 1 700 páginas y pesa 4 kg! Afortunadamente existe la versión de internet, donde todos estos datos se encuentran accesibles. Entre muchas otras cosas, podemos cotejar las masas de todas las partículas que se han encontrado hasta la fecha, unas 4000 en total.

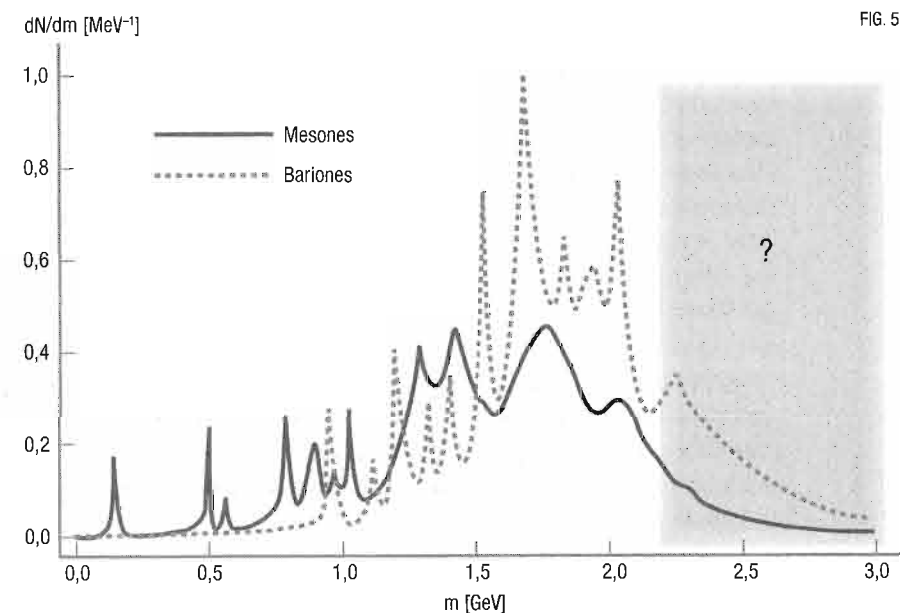
En la figura 4 representamos mediante una línea horizontal cada partícula que aparece en esa «Biblia» de las partículas, ordenada según su masa, o mejor aún, según la energía que obtendríamos si la aniquilásemos ($E = mc^2$). El grosor de las líneas es proporcional al número de partículas que tienen la misma masa. Esto se llama *multiplicidad* o degeneración, y teóricamente se interpreta como distintos estados posibles de la misma partícula. Si nos concentramos en las líneas más bajas, veremos que están muy separadas, pero cuando subimos, las líneas con grosor empiezan a solaparse y vemos una especie de sucesión de manchas negras. La figura es algo así como el código de barras de la materia. La explicación de este código de barras es uno de los grandes problemas actuales en física de partículas.

Una forma de ordenar toda la información es mediante un *histograma*, es decir, un diagrama de barras donde representamos la frecuencia con la que ocurre algo (recogido como un dato) en un cierto intervalo mediante una barra cuya altura da la frecuencia y cuya anchura viene dada por el intervalo. Lógicamente la suma de todas las alturas tiene que reproducir el número total de datos. Por eso, para poder comparar histogramas con distinto número total de datos lo que suele hacerse es dividir la altura de la barra por dicho número total de datos, dando lugar a un histograma normalizado. Por otro lado, el perfil de las barras empezará a tomar un aspecto regular cuando el número de datos sea grande, de manera que podremos visualizar mejor la información dibujando la curva. Esto es lo que llamamos una *distribución estadística normalizada*, y viene a representar la probabilidad con que esperamos encontrar un cierto dato.

En la figura 5 podemos ver la distribución normalizada de masas del PDG y que como hemos dicho representa la probabilidad de encontrar un estado con una cierta masa.

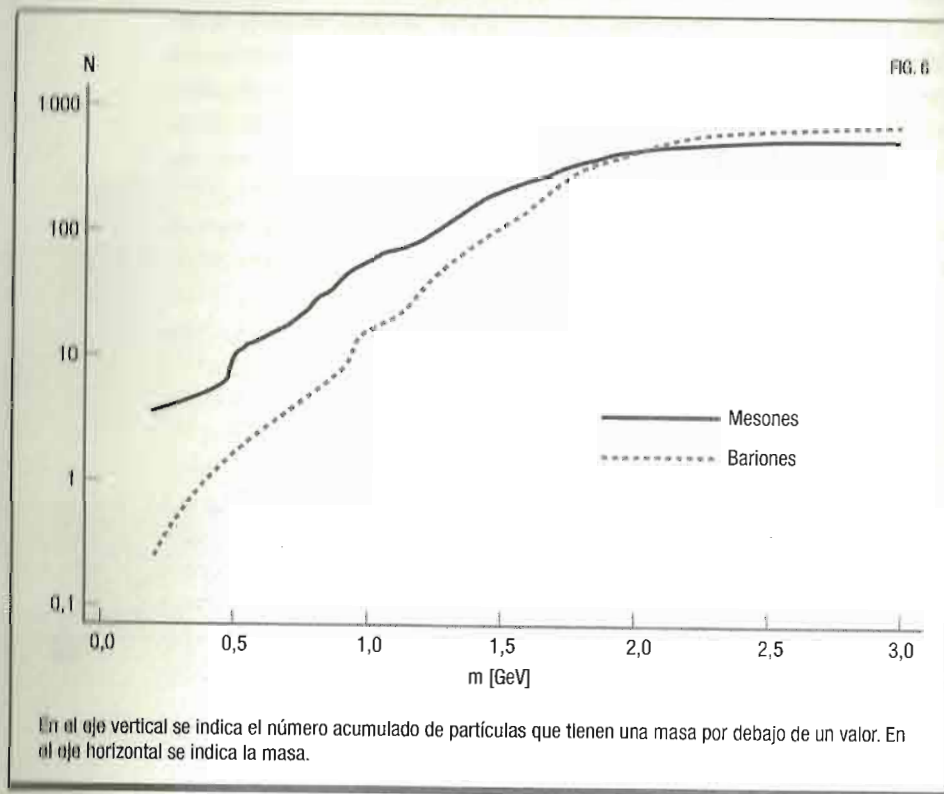


Espectro de las partículas.



Distribución normalizada de masas del PDG. En el eje vertical se indica el número de partículas por unidad de masa; en el horizontal, la masa.

Como vemos, tenemos algunos picos que corresponden a zonas donde las partículas que se han descubierto desde 1936 están más aisladas. Hay algo que llama la atención, y es que la masa parece tener un máximo en la zona central, lo que sugiere que estas masas son más probables. El signo de interrogación indica que no se sabe si es que no hay más estados o si es que no se han detectado aún. Otra forma de organizar la información es, simplemente, contar cuántos estados hadrónicos hay con masa por debajo de un valor prefijado (figura 6). Lo hemos dibujado en escala logarítmica, dado que el número de partículas con una masa inferior a otra dada aumenta muy rápidamente. Como se aprecia, la curva es mucho más regular, y parece una recta. La verdadera acumulación de datos comenzó en el CERN



(siglas en francés de la Organización Europea para la Investigación Nuclear) en la década de 1960, cuando Rolf Hagedorn se dio cuenta de este hecho, aunque las energías eran mucho más bajas. El caso es que vio la línea recta y «predijo» el número de estados que se encontrarían cuando la energía aumentase en los aceleradores. Sus predicciones fueron un éxito, y se produjo una gran excitación en la comunidad científica. Todos querían entender por qué después de detectar tantas partículas diferentes había un patrón de comportamiento asombrosamente simple, a saber

$$\log N(m) = (mc^2)/(k_B T_H).$$

El parámetro T_H se ha escrito como una temperatura, que se denomina *temperatura de Hagedorn*.

El gas hadrónico ideal

Ya hemos dicho que el vacío está lleno de materia y antimateria sumando número bariónico cero. Por tanto podemos calentarlo y ver qué presión genera. Hagedorn concibió el vacío como un conjunto de los estados hadrónicos semejantes al gas ideal, con la única novedad de incorporar la relatividad y tratarlo como un sistema multicomponente. Como en química, la presión total del gas hadrónico es la suma de las presiones parciales de cada uno de los hadrones. Al igual que la presión barométrica del aire, que disminuye conforme ganamos altura y por tanto energía, la presión parcial de los hadrones con masas más pesadas ha de disminuir. Ahora bien, todo depende de cuántas partículas tengamos. Si el número de estados crece tan rápidamente como se observa, puede demostrarse que cuando la temperatura se acerca a la temperatura de Hagedorn, la presión se hace infinita y la capacidad de absorber calor también. Esto se interpretó como una temperatura límite por encima de la cual la materia absorbería todo el calor que se le suministrase, actuando como un termostato.

EL PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

La predicción de Hagedorn ha resultado ser cierta en lo esencial: existe una temperatura por encima de la cual la materia hadrónica no existe como tal. La identidad de la materia y del número bariónico se desvanecen. Sin embargo, Collins y Perry notaron en 1975 que había una alternativa, y que era posible un estado de la materia donde los quarks anduvieran libremente por el espacio. La temperatura de Hagedorn no quedó como una temperatura límite sino más bien como una en la cual los hadrones se descomponen en sus constituyentes más fundamentales: quarks y gluones.

Colisiones entre iones pesados

En 1971, T.D. Lee sugirió la posibilidad de crear estados de muy alta densidad de materia y así explorar nuevas fases y sus propiedades. Cuando se descubrió la libertad asintótica de los quarks, quedó patente el hecho de que teóricamente debía ser posible encontrar una fase nueva de la materia donde el número bariónico se encuentra distribuido de manera uniforme en el espacio. Pero ¿cuál es la densidad a partir de la cual puede ocurrir esto? Cuando la temperatura es muy alta se espera que la densidad de energía sea proporcional a la temperatura a la cuarta potencia. Una forma de conseguir altas densidades es tratando de superponer un núcleo encima de otro. Desgraciadamente no podemos coger los núcleos con unas pinzas y ponerlos donde queramos; esto solo puede conseguirse en el laboratorio lanzándolos a grandes velocidades, con lo que aumentamos la presión, y produciendo partículas, con lo que aplicamos calor elevando la temperatura. La receta, pues, para el plasma de quarks y gluones es

Presión + Calor = Plasma.

Para ello se necesitan grandes instalaciones como el SPS (*Super Proton Synchrotron*), el RHIC (*Relativistic Heavy Ion Colli-*

der) o el LHC (*Large Hadron Collider*) capaces de generar tales condiciones. Si el choque es frontal, esperamos que la colisión sea lo más destructiva posible. De hecho, lo que ocurre es que se producen colisiones múltiples; es como cuando dos equipos de rugby chocan: aunque los jugadores se encuentran unidos y compactados, el choque provoca que inevitablemente cada equipo se desgaje y fragmente en sus individuos constituyentes.

La imagen espacio-temporal en boga se debe a James Bjorken. La idea es que los núcleos se acercan a casi la velocidad de la luz hasta que chocan. Elegimos el momento del choque como el tiempo cero y ahí centramos el vértice del cono de luz. Tiempos negativos nos llevan hacia el pasado, mientras que tiempos positivos se corresponden con el futuro. Después de la colisión, los fragmentos se mueven en direcciones opuestas con distintas velocidades. Si nos fijamos en aquellos fragmentos que se encuentran parados veremos que para ellos el tiempo pasa exactamente como lo medimos en el laboratorio, así que si tenemos un plasma de partículas solo tenemos que esperar un tiempo hasta que los quarks y gluones se recombinan para formar hadrones. Ese tiempo es el tiempo de vida del plasma. Sin embargo, aquellos fragmentos que vayan con velocidades cercanas a la de la luz nos parece que persisten durante muchísimo más tiempo, y que nunca llegarán a formar hadrones. Este es, una vez más, el efecto de la dilatación del tiempo. La rápida expansión que sigue a la ignición inicial de la «bola de fuego» (la «explosión» en el punto de la colisión) tiene como consecuencia el enfriamiento del sistema. Una de las formas de ver qué ocurre es detectar los fotones que son emitidos en todo momento por la bola de fuego u otras partículas.

Una de las grandes ventajas del punto de vista hidrodinámico es que no es necesario pronunciarse sobre la estructura del sistema, sino que basta con especificar la ecuación de estado, es decir, la relación entre presión, densidad y temperatura, como se hace en la predicción del tiempo. Los modelos más modernos siguen las ideas de Landau y Bjorken en lo esencial, o sea, una hidrodinámica relativista y la inclusión de efectos típicos de los fluidos como la viscosidad o la conductividad térmica.

Evidencias teóricas de la transición de fase

La QCD es una teoría fácil de escribir pero muy compleja de resolver. Sin embargo, tiene dos propiedades, la libertad asintótica y el *confinamiento*, que son fáciles de entender y sencillas de modelar. La libertad asintótica nos dice que a cortas distancias los quarks se comportan como partículas libres. El confinamiento, que su interacción a grandes distancias es tan grande que se necesita una energía infinita para aislarlos. En el modelo de la burbuja, los quarks se mueven libremente en el interior de una cavidad de la que no pueden escapar, rodeados por un mar de partículas-antipartículas. Esta imagen sugiere que si tenemos un sistema con una densidad suficientemente alta, las burbujas experimentan un proceso de nucleación para formar una gran burbuja, y ello ha motivado cálculos complejos que han corroborado cualitativamente la idea.

Indicios del plasma líquido

Para empezar, cuando hablamos de un estado de la materia, ¿cómo sabemos que tenemos tal o cual estado mediante la colisión de iones pesados? La materia es macroscópica, y sin embargo pretendemos generar un trozo de la misma a partir de dos sistemas ínfimos como son dos núcleos atómicos. La respuesta más rápida es: basándonos en su comportamiento. Hemos de ser capaces de ver propiedades que nos recuerden a las que observamos en la materia conocida.

Un argumento a favor de que hay un estado macroscópico es que las tasas de producción de partículas en la dirección transversal al choque se describen suponiendo que la bola de fuego se encuentra en equilibrio y a una temperatura de 150 MeV, es decir, un par de billones de grados. Esto sugiere que algo fluye en la dirección transversal, aunque no inclina la balanza a favor de un gas o un líquido; la forma de fluir importa.

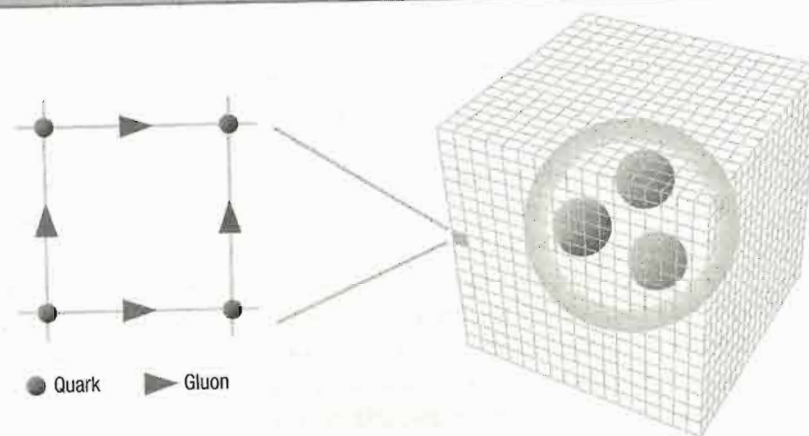
Hay muchos indicios que sugieren que el ansiado plasma se ha conseguido como estado colectivo, pero lejos de tratarse de un

EL RETÍCULO DE QCD

La libertad asintótica tiene una ventaja especial que ha demostrado ser de gran utilidad para resolver matemáticamente la teoría QCD de forma aproximada mediante simulaciones numéricas. La idea se debe a Kenneth Wilson, quien en 1974 propuso discretizar el espacio y el tiempo en un retículo de sucesos con tamaños Δx y Δt , donde los nodos son ocupados por quarks y las interconexiones por gluones (véase la figura). Esta aproximación viola la continuidad del espacio y el tiempo, así como su isotropía.

Un reto computacional

Las discretizaciones de este tipo se hacen frecuentemente en el análisis numérico de muchas ecuaciones; a medida que las celdillas de la red sean cada vez menores se espera que la aproximación sea cada vez más precisa. La libertad asintótica lo garantiza, puesto que la interacción gluónica (interconexiones) entre los quarks (nodos) se hace pequeña. De hecho, para un sistema como el protón que, como vimos, tiene un tamaño de 1 fm, los retículos se toman de 0,1 fm, es decir, 10 puntos en cada dirección espacial, o sea $10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$ puntos. La electrodinámica cuántica no tiene esta propiedad y, por tanto, no puede aproximarse por este método. En la QCD, las masas de los hadrones más ligeros calculadas por este procedimiento han dado excelentes resultados, aportando una enorme seguridad sobre la fiabilidad de la teoría. Sin embargo, en situaciones de índole más termodinámica y cuando la densidad de materia aumenta, las dificultades computacionales son enormes incluso utilizando métodos de fuerza bruta, y el terreno aquí es enormemente especulativo. No cabe sino esperar a que alguien tenga una idea genial.



Retículo de sucesos, propuesto por Kenneth Wilson en 1974, donde los nodos son ocupados por quarks y las interconexiones por gluones.

gas ideal de quarks y gluones, como se había anticipado teóricamente, lo que se ve es que se comporta como un líquido. Entre las evidencias disponibles, la que quizá resulta más llamativa es el llamado *flujo elíptico*.

El flujo elíptico es una característica hidrodinámica de la manera en que se ha generado el plasma de quarks y gluones. Cuando dos núcleos chocan la materia que se genera proviene de las colisiones inelásticas entre los nucleones. Dado que la velocidad es muy cercana a la de la luz, se produce una contracción de Lorentz en el sistema de laboratorio. Como ocurre con los accidentes de tráfico, la colisión frontal maximiza los daños, o sea, el número de procesos inelásticos. Sin embargo, la colisión frontal ocurre de cuando en cuando. Puede no haber colisiones, o una colisión más periférica, que corresponde a la intersección de dos círculos, y tiene forma de almendra.

Por tanto, la bola de fuego no es esférica sino que en muchas ocasiones adquiere esa forma almendrada. Esto implica que la onda expansiva no será esférica y los fragmentos eyectados seguirán el gradiente de presión mayor, de la misma forma que las zonas de bajas presiones en la atmósfera propician la actividad ciclónica que precede al mal tiempo.

Podemos describir un símil del flujo elíptico fácil de entender. Si lanzamos muchas veces un globo no esférico sino alargado, en forma de morcilla, y lleno de agua, al interior de un círculo de personas para que explote, al final todas acaban mojándose. Sin embargo, si cada vez que tiramos el globo preguntamos quién se ha mojado, veremos que cuando a alguien le pasa, al de enfrente también le ha ocurrido. Por tanto, si repetimos la pregunta muchas veces veremos que hay una correlación entre una persona y la de enfrente. De este modo, el estudio de las correlaciones permite determinar la forma de la bola de fuego. El flujo elíptico ha sido confirmado con núcleos de oro por los detectores del RHIC, conocidos como BRAHMS, PHENIX, PHOBOS y STAR. En la colisión se liberan unas 5000 partículas en promedio, la presión alcanzada es de 10^{30} atm, un quintillón de veces la presión atmosférica, y la temperatura es de 10^{12} °C (un billón de grados). El detector del LHC, por su parte, es como una cúpula

esférica llena de una infinidad de pupilas parecidas al ojo de una mosca que miran hacia el origen de la bola de fuego y que pueden detectar ese flujo elíptico.

Sin embargo, tener un fluido, sea este líquido o gas, no significa necesariamente que los quarks y los gluones se muevan con libertad más allá del volumen de los hadrones donde se encuentran confinados. La evidencia a favor del deconfinamiento de los quarks la proporciona el déficit de partículas J/ψ , que son estados ligados quark-antiquark y que se detectan a partir de la bola de fuego cuando las energías con las que se lanzan los núcleos se corresponden con las temperaturas críticas donde ocurre el cambio de la fase hadrónica a la fase de plasma. La interpretación es que ciertos estados hadrónicos se disuelven en el plasma caliente, por la misma razón que se disuelve el azúcar en el agua cuando la calentamos, sin necesidad de agitar.

Otro indicio es la emisión unilateral de chorros de partículas. En una colisión a alta energía entre partículas idénticas y a la misma velocidad, los productos de la colisión no se emiten en todas las direcciones por igual. En lugar de eso se emiten dos chorros casi idénticos en direcciones contrarias, ya que el momento tiene que conservarse. Cuando se produce el plasma, los chorros que se ocasionen en el interior tendrán que atravesarlo, lo cual los atenuará en gran medida. Pero para los chorros que se produzcan en el borde, la componente que sale es la que se detecta, dado que la otra tiene que atravesar todo el plasma. En el RHIC se han observado los chorros unilaterales.

Además, se han visto más trazas inequívocas de comportamiento fluido, como es la viscosidad que genera una fricción en su interior. Cuando un fluido se mueve en una tubería no fluye de forma plana, sino que la forma del frente es parabólica en cada instante de tiempo. La razón es que se produce un trasiego de momento en la dirección transversal debido a las colisiones entre las partículas del fluido. Para un fluido sujeto a las leyes de la hidrodinámica relativista esto sigue siendo cierto, aunque la confirmación teórica por parte de la QCD es extremadamente compleja.

Un líquido se define por su capacidad de fluir, y desde este punto de vista la colisión de dos partículas ínfimas a muy altas

energías posee esa notable propiedad. Recientemente se ha encontrado que la colisión de un protón y un núcleo de plomo tiene esa capacidad, y hay quien piensa que incluso las colisiones protón-protón pueden generar un flujo elíptico. Si es así, la visión estadística de Fermi y la hidrodinámica de Isaak Pomeranchuk y Landau se verían confirmadas tras más de sesenta años.

A pesar de que existen estos indicios de la formación del estado donde la carga de color circula libremente, no queda claro cómo es que se provoca el cambio de fase. Una de las imágenes más llamativas la proporciona el *modelo de percolación de los hadrones*. Para entenderlo mejor, pensemos en la materia ordinaria formada por átomos compuestos por electrones y núcleos. Existen dos formas de aumentar la conductividad en un metal. Una es calentándolo; con ello conseguimos que los electrones se separen de los átomos a los que pertenecían inicialmente. Este es el *efecto termoiónico* que es el precursor de la formación del plasma. La otra forma es comprimiéndolo; de esa forma los electrones de un átomo pasan al siguiente. Esta es la manera en la que el hidrógeno metálico se genera, por ejemplo, en las zonas cercanas a la superficie del planeta Júpiter. Este estado ya fue predicho por Eugene Wigner en la década de 1930. En el modelo de percolación, los hadrones van pegándose unos a otros hasta que no queda volumen excluido, propiciando la conductividad de la carga de color.

Los extremos se tocan

Los estados de la materia existen y coexisten. Nuestra experiencia nos ha enseñado a percibir una diferencia importante entre sólido, líquido y gaseoso. Pero hay situaciones donde esas diferencias son intangibles y la estructura está contenida en sí misma de forma repetitiva.

La astrofísica ha sido y sigue siendo una ciencia a merced de los caprichos de la naturaleza. Cuenta con un componente observacional muy fuerte, pero nunca ha sido capaz de realizar experimentos controlados en laboratorio donde se pueda provocar algún fenómeno importante completo, como el nacimiento o la muerte de una estrella. Salvando esta diferencia, los problemas que tienen los físicos experimentales cuando miran la bola de fuego cada vez que se produce en el RHIC y en el LHC son muy parecidos a los de los astrónomos que observan el firmamento emitiendo radiación desde el comienzo de los tiempos. Lo que sabemos sobre el plasma de quarks y gluones que se genera en el laboratorio se basa, al igual que en astrofísica, en recoger la infinidad de cenizas que quedan de la ignición inicial. Desde luego, una diferencia básica entre el Big Bang y el *Little Bang* (la explosión generadora de nuevas partículas que se desencadena en una colisión) es la gravedad que, al ser una fuerza atractiva, ralentiza la expansión. Por lo demás, todo es igual.

La teoría hoy en día más aceptada admite que tras la formación del plasma se produce rápidamente la recombinación y un enfriamiento para generar un gas de resonancias hadrónicas

que finalmente decae en los productos que son detectados. La actividad química se detiene antes que el enfriamiento térmico. A bajas energías, cuando el sistema se enfría y la temperatura correspondiente al equilibrio químico supera a la del equilibrio térmico, los procesos elásticos dominan sobre los inelásticos. Existen dudas sobre los instantes iniciales y algunos científicos creen que previamente a la formación del plasma se forma otra fase con tal abundancia de gluones que parece un vidrio amorfo.

ESPACIO VACÍO

El casi invisible aire que respiramos contiene la inmensidad de $2,6 \cdot 10^{22}$ moléculas por litro; es materia en forma de gas, que podemos tratar de diluir al máximo. Sin embargo, la ausencia de materia es el vacío. ¿Es esta una forma de materia extrema? El vacío perfecto en el laboratorio no existe. Esto se debe a que para conseguirlo hemos de blindar el recipiente. Pero dado que no está a temperatura cero, en general emitirá calor que terminará arrancando alguna de las partículas del recipiente: siempre habrá una presión de vapor. La única forma de impedirlo sería bajar al cero absoluto, lo cual por otro lado sabemos que es imposible según la mecánica cuántica. El mejor vacío que han sido capaces de conseguir los científicos en los tubos del LHC donde se aceleran los protones que colisionan exclusivamente entre sí alcanza una presión muy baja comparada con la de la atmósfera terrestre, del orden de 10^{-13} atm. La temperatura es también mucho más baja que la terrestre más fría; es de 1,9 K, y se consigue gracias a imanes superconductores. El vacío logrado corresponde a $3,8 \cdot 10^8$ moléculas por metro cúbico. En cuanto a vacíos naturales, la densidad de materia en el espacio interestelar es de unas 1 000 moléculas por litro, pero más baja aún es la del espacio intergaláctico: una molécula por cada 1 000 litros, junto con una temperatura de 3 K proveniente de la radiación de fondo (definible como los «rescaldos» del Big Bang).

Durante algún tiempo se pensó que el espacio estaba lleno de éter, una sustancia que hacía entendible la altísima velocidad

de propagación de la luz por medios mecánicos, como las vibraciones en una viga. Según la *teoría de la elasticidad*, las ondas mecánicas se propagan más rápido en medios poco densos y extraordinariamente rígidos. Para el aluminio la velocidad de propagación es de 6 000 m/s y para el diamante 12 000 m/s, unas 20 veces la del sonido en el aire. De ahí hasta los 300 000 km/s va un gran trecho. Para eso haría falta algo tan rígido como el diamante, pero diez mil millones de veces menos denso, algo así como separar los átomos de carbono a 4 000 veces la distancia a la que están en él. Pero esto es muchísimo más denso que la densidad de materia en el espacio interestelar. La existencia del éter sugería que habría una resistencia al movimiento de la Tierra en el espacio, y como los sólidos, se manifestaría en diferentes velocidades de propagación de la luz en las direcciones longitudinales y transversales, debido al arrastre del éter. Afortunadamente, el experimento de Michelson-Morley demostró en 1887 que la velocidad de la luz no depende de la dirección de propagación, con lo que la idea del éter fue abandonada.

Como ya decíamos, los hadrones son partículas verdaderamente curiosas. En realidad se comportan como burbujas en un medio repleto de pares de quarks y antiquarks. Pero si el vacío está lleno de una proporción exactamente equilibrada de materia y antimateria, aunque la densidad bariónica sea cero, las fluctuaciones de densidad bariónica hacen que su estructura sea realmente menos trivial de lo que uno pueda imaginar. De hecho, la granularidad del vacío ocurre a distancias verdaderamente cortas, de forma que solo esperamos que tengan alguna importancia cuando podemos bombear partículas y sus antipartículas del vacío.

Si depositamos materia o energía en el vacío, el entorno inmediato se ve afectado porque el vacío se polariza, del mismo modo que cuando ponemos una piedra en un colchón plano, este se deforma desde su forma original. En el caso del colchón, no solo importan el tamaño y el peso de la piedra; el grado de rigidez del colchón también influye en la deformación. Lo que queremos decir es que el vacío no es infinitamente rígido, precisamente porque en muchos aspectos está lleno.

Si hay dos bolas rodando por el colchón, cada una comienza a experimentar los efectos de la presencia de la otra antes de que lleguen a tocarse. Por el mismo motivo, el vacío puede calentarse al excitar térmicamente las partículas y antipartículas que hay en él. Incluso a las más bajas temperaturas experimentaremos una radiación procedente de una engañosa y burbujeante nada.

EL DIAGRAMA DE LAS FASES Y PUNTOS CRÍTICOS

En 1860, Thomas Andrews observó que un gas puede convertirse en líquido solo comprimiéndolo por debajo de una cierta temperatura crítica, por encima de la cual la materia existe como una única fase fluida. Para el dióxido de carbono (CO_2), la temperatura crítica es de 30°C . Los gases permanentes como el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno también tienen temperaturas críticas, aunque muy por debajo de la temperatura ambiente. En sus estudios, Van der Waals demostró que gas y líquido son la misma materia agregada de forma diferente y su ecuación de estado predecía esa temperatura crítica. Pero la presión (P), el volumen (V) y la temperatura (T) que aparecen en la ecuación de estado son valores promediados durante un tiempo suficientemente largo. A escalas de tiempo inferiores, se producen fluctuaciones en P , V y T , que se magnifican sobremanera cuando nos acercamos al punto crítico. Una consecuencia de las fluctuaciones en densidad es la *opalescencia crítica*, consistente en el color lechoso que adquiere el gas líquido en el punto crítico. Este hecho fue sugerido por el físico polaco Marian Smoluchowski en 1910, pero la explicación cuantitativa, en ese mismo año, es obra de Albert Einstein.

Dispersión coherente e incoherente

La razón por la que esto ocurre es en el fondo la misma que explica el azul del cielo, el rojo del atardecer, el color blanco de las nubes y la transparencia del agua. Para empezar, recorde-

mos que Newton estableció que la luz que pasa por el prisma se separa en los colores del arcoíris, y la que más se desvía es precisamente la luz azul y la que menos la luz roja. De igual manera, la luz que nos llega del Sol se dispersa al incidir verticalmente en la atmósfera, que hace de prisma dispersando la luz azul en todas las direcciones. Durante el atardecer, los rayos del Sol tienen que atravesar un mayor grosor de atmósfera, ya que inciden casi horizontalmente, y los que menos se

La teoría guía, el experimento decide.

ANÓNIMO, ATRIBUIDO A MUCHOS CIENTÍFICOS

desvían son los de color rojo, que son los que vemos. La opacidad de la atmósfera se hace patente cuando vemos cómo los objetos a grandes distancias terminan difuminándose; incluso en los días más claros la visibilidad es de unos 100 km.

Ya vimos que la luz se dispersa en la materia debido a la radiación emitida por los electrones que son acelerados por la luz incidente. Sin embargo, cada electrón emite luz y lo que importa es si la emisión se hace al unísono o de forma independiente, o en otras palabras, de forma coherente o incoherente. Para una longitud de onda determinada, todos los electrones que estén dentro de una longitud de onda lo hacen de forma coordinada, mientras que los que estén en distintas longitudes de onda lo hacen sin coordinación alguna. Esto nos permite en la práctica trocear de forma imaginaria la materia en dominios cuyo tamaño típico es la longitud de onda de la luz. En una nube, lo que tenemos son gotas de vapor de agua condensadas, pero la humedad del aire en el entorno de la nube es exactamente la misma; lo único que cambia es si las moléculas de agua están concentradas en una misma gota o no. Cuando las moléculas vagan libremente, los electrones que en cada molécula dispersan la luz lo hacen coherentemente entre sí porque el tamaño de la molécula es muchísimo menor que la longitud de onda, pero cada molécula dispersa la luz de forma independiente. Cuando las moléculas empiezan a agregarse, la opacidad aumenta hasta que el tamaño de la gota es tan grande como la longitud de onda. El color blanco de la nube es la luz reflejada, lo que demuestra que de hecho la luz que viene del Sol ¡es blanca! Los negros

nubarrones que preceden a la lluvia son consecuencia de que la luz además de dispersarse también es absorbida por el vapor de agua, y se refleja menos luz blanca cuando la condensación aumenta. Pero entonces, si las nubes son opacas y blancas, grises o negras, ¿por qué el agua es tan transparente? La razón está en que en el fluido las moléculas de agua se mueven de forma errática e independiente y por tanto dispersan la luz de forma totalmente incoherente.

Pues bien, la opalescencia crítica se produce porque cerca del punto crítico las fluctuaciones de la densidad empiezan a ser grandes y de gran alcance, cosa que explica el aspecto lechoso que Andrews observó. Estas fluctuaciones crean estructuras repetitivas, como las muñecas rusas, que generan la llamada invariancia de escala, y han sido estudiadas mediante el grupo de renormalización.

EL PUNTO CRÍTICO: GAS HADRÓNICO Y PLASMA GLUÓNICO

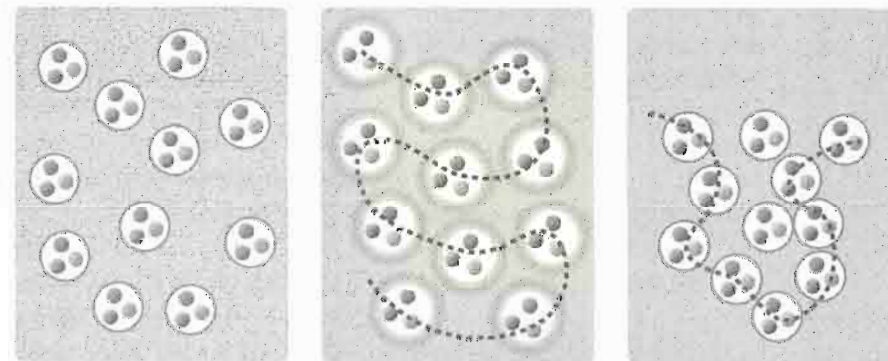
Durante mucho tiempo se pensó que la diferencia entre el gas hadrónico y el plasma de quarks y gluones sería nítida. El modelo burbuja encaja perfectamente con esta imagen, dado que cuando las calentamos, las burbujas aumentan de tamaño pudiendo llegar a tocarse y dejar que los quarks vaguen libremente entre hadrones que se tocan. La otra posibilidad es apretar los hadrones, es decir, aumentar la densidad con idéntico efecto. Por tanto, habría una línea en el diagrama temperatura-densidad que separaría claramente el gas de hadrones del plasma de quarks y gluones.

Pero en 2006 un grupo dirigido por el húngaro Zoltán Fodor, que propuso tratar los complejos cálculos en QCD como un videojuego, usando tarjetas gráficas como medio de cálculo muy eficiente, encontró algo sorprendente: cuando la densidad bariónica es cero, la imagen basada en el modelo de burbujas con una pared nítida no es adecuada (figura 1). De hecho, la pared de la burbuja es difusa y esa difusividad crece con la temperatura, haciendo que las burbujas se difuminen antes de tocarse y ge-

nerar el plasma donde un relámpago de color de una tormenta cromoelectrónica podría propagarse. El gas hadrónico no se diferencia un ápice del gas ideal cuántico y relativista y como tal permite que el sonido, entendido como ondas de densidad bariónica, se propague. De hecho, hay un valor de temperatura que proporciona un valor mínimo de la velocidad del sonido, algo más de la mitad de la velocidad de la luz, que es el que se identifica con la temperatura crítica a densidad cero. Por otro lado, se ha estimado también teóricamente que a bajas temperaturas y altas densidades la separación de fases es nítida. En el caso del plasma de quarks y gluones se espera que haya un punto crítico para un valor aún incierto de la densidad bariónica.

La *femtoscopia* es una nueva rama científica que investiga correlaciones entre partículas emitidas en la colisión y señales de un fenómeno similar a la opalescencia crítica. Se buscan fluctuaciones de densidad de materia, o lo que es lo mismo, de densidad bariónica, en los grandes aceleradores como el RHIC y el LHC. Esta sería la señal que se está buscando como indicativo de que el punto crítico ha sido finalmente encontrado. La infor-

FIG. 1



Gas de burbujas hadrónicas difusas (izquierda), cuando se calienta (centro) y cuando se comprime (derecha). Al calentar las burbujas, crecen y desarrollan paredes difusas. Las líneas representan posibles relámpagos de tormenta cromoelectrónica a través de zonas de conductividad de color.

mación que dicho hallazgo proporcionaría sería valiosísima, ya que permitiría conocer mucho mejor el mecanismo del deconfinamiento, del que desgraciadamente aún se sabe poco.

LOS SONIDOS DEL SILENCIO

Podemos ver y escuchar al Big Bang, la gran obertura de una sinfonía celestial cuyos destellos y ecos llegan hasta nuestros días. No sabemos cómo acabará la obra, si su cadencia será con-

clusiva o suspensiva, si será un punto y final, un punto y coma, o una coma, o ni siquiera si hay una partitura que alguien dejó escrita o se escribió a sí misma. Probablemente para nosotros sean siempre unos puntos suspen-

sivos dejándonos imaginar, como en las buenas películas, finales distintos. El descubrimiento de la energía oscura ha demostrado que hasta las ideas más desterradas y proscritas vuelven a ser repatriadas y amnistiadas en el club de las teorías respetables. El Little Bang reproduce lo que sabemos en los primeros microcompases y, a diferencia del Big Bang, nos permite oír a la orquesta afinar sus instrumentos cuando los núcleos de oro se contraen por efecto de la relatividad. Después, solo queda el mudo silencio que la mente humana reserva para los pensamientos más profundos.

El mundo es mi patria, la ciencia
mi religión.

CHRISTIAAN HUYGENS

LECTURAS RECOMENDADAS

- ASIMOV, I., *La medición del universo*, Barcelona, RBA, 1992.
- BATTANER LÓPEZ, E., *Introducción a la astrofísica*, Madrid, Alianza Editorial, 1999.
- DE LOS ARCOS, T. Y TANARRO, I., *Plasma: el cuarto estado de la materia*, Madrid, Publicaciones del CSIC, 2016.
- FRITZSCH, H., *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*, Madrid, Alianza Editorial, 1994.
- GAMOW, G., *Un, dos, tres... infinito*, Barcelona, RBA, 1993.
- GORDON, J.E., *La nueva ciencia de los materiales*, Madrid, Celeste Ediciones, 2002.
- HOLTON, G., *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Barcelona, Editorial Reverté, 1988.
- HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Editorial Planeta, 2013.
- KITAIGORODSKI, A.I. Y LANDAU, L., *Física para todos*, Moscú, Editorial Mir, 1984.
- MILÁNTIEV, V.P. Y TEMKÓ, S.V., *Física del plasma*, Moscú, Editorial URSS, 1995.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, RBA, 1992.
- SOLÍS, C. Y SELLÉS, M., *Historia de la ciencia*, Barcelona, Espasa Libros, 2013.

- STEWART, I., *Juega Dios a los dados?*, Barcelona, Editorial Planeta, 2012.
- WEINBERG, S., *Los tres primeros minutos del universo*, Madrid, Alianza Editorial, 2009.
- YNDURÁIN, F.J., *Electrones, neutrinos y quarks*, Barcelona, Crítica, 2006.

ÍNDICE

- agujero negro 8, 120
- amortiguamiento de Landau 144, 146
- análisis de Fourier 74, 80
- antimateria 13, 14, 127, 153, 165
- antipartículas 12, 100, 102, 104-106, 108, 109, 127, 129, 130, 156, 159, 165, 166
- apantallamiento de Debye 107, 140, 141
- arcoíris 76, 78, 127, 167
- átomos 8-11, 20-22, 24-27, 39, 43, 45, 46, 49-51, 53, 55, 57-62, 64-68, 71, 77, 81, 83, 85, 86, 88, 100, 109-113, 117, 118, 120, 122, 126, 137, 139, 141, 147, 148, 160, 165
- azul del cielo 166, 167
- bariones 109, 111, 151, 152
- Bernoulli, hermanos 42, 44, 45, 49
- Big Bang 163, 164, 170
- Born, Max 79, 97
- bosones 81, 83-85, 107-109, 111, 112
- Boyle, Robert 36, 41, 43
- chorros unilaterales 159
- cohesión molecular 40, 53, 113
- colisiones entre iones pesados 154, 156
- color 76, 78, 126-129, 132, 138, 160, 166, 167, 169
- condensado atómico de Bose-Einstein 10, 84, 85, 132
- confinamiento 129, 130, 132, 133, 156
- constante de Planck 79, 100
- contracción de Lorentz 91, 149, 158
- cromodinámica cuántica *véase* QCD
- Crookes, William 64, 138, 139
- cuantización
- de la materia 22, 24, 41, 42, 45, 59, 60, 62, 64, 80
 - del dinero 22, 23
- densidad 8, 9, 11-14, 34, 35, 38, 41, 45, 46, 49-51, 67, 85, 109, 113, 115, 118, 119, 121-124, 126, 134, 138, 139, 141-143, 149, 154-157, 164-166, 168, 169
- descargas gaseosas 138
- diagrama de las fases 14, 141, 166
- difracción 72, 73, 78, 79
- dilatación del tiempo 91, 155
- Dirac, Paul 109
- dualidad onda-partícula 78, 79

ecos *post mortem* 146
 ecuación de estado 9, 34, 41, 43, 49, 51, 155, 166
 efecto
 fotoeléctrico 78
 termolónico 160
 efectos relativistas 90
 Einstein, Albert 9, 24, 46, 58, 78, 92, 97, 166
 electrólisis 10, 60, 62, 63
 electrolitos 107, 141
 enana blanca 119, 120
 energía
 cinética 10, 21, 42, 44, 71, 94, 95, 142, 147
 de Fermi 83, 84, 119, 132
 entalpía 52, 53
 entropía 39
 equilibrio completo e incompleto 141, 142
 escala musical 75
 espacio interestelar 164, 165
 espectro electromagnético 137
 espín 104, 120, 126, 128
 estados
 clásicos de la materia 50
 virtuales 103
 estrella de neutrones 120, 122, 124, 125, 132-134, 148
 estructura granulada 109
 éter 164, 165
 experimento de Magdeburgo 37
 Faraday, Michael 10, 60-62, 137
 femtoscopía 169
 fermiones 81, 83-85, 107, 108, 111, 112, 118, 119, 123, 124, 126, 128, 132
 Feynman, Richard 58, 73, 101, 128, 149
 flujo elíptico 158-160
 fórmula barométrica 46, 47, 85
 fotones 11, 13, 21, 65, 66, 78-81, 83, 100, 101, 104, 106-109, 111-113, 128, 130, 155
 fuerzas de intercambio 102, 103
 fusión nuclear 94, 120, 146-148
 Gamow, George 25, 87, 122, 123

gas
 hadrónico 14, 163, 168, 169
 ideal 42, 48, 49, 51, 53, 123, 153, 168, 169
 real 48, 49, 51
 geosfera 119
 gluon 12-14, 49, 67, 100, 104, 109, 127-129, 148, 154, 155, 157-159, 163, 164, 168, 169
 hadrones 67, 100, 104, 109, 113, 130, 131, 149, 151, 153-155, 157, 159, 160, 165, 168
 Hagedorn, Rudolf 153, 154
 hipermateria 13
 Hooke, Robert 36
 inversión cronológica 93, 101
 ionosfera 47, 50, 143, 144
 ITER 148
 Kronecker, Leopold 20-22
 Landau, Lev 124, 125, 132, 146, 149, 155, 160
 leptones 13, 108, 109
 ley de los gases ideales 51
 leyes de conservación 13, 95, 102, 107, 121, 142
 LHC 95, 155, 158, 164, 169
 libertad asintótica 128, 132, 154, 156, 157
 Little Bang 163, 170
 logaritmos 28, 29
 masa y energía 92, 94, 150
 materia
 blanda 113
 extrema 7, 8, 14, 113, 119, 164
 gris 7
 neutrónica 12-14, 123-125
 nuclear 11, 12, 14, 120, 123, 124, 132, 134
 quarkónica 13, 14, 132, 134
 mecánica cuántica 10, 11, 39, 51, 69, 71-73, 79-82, 84, 85, 97, 99, 102, 112, 126, 164

mesones 11, 13, 104, 109, 111, 113, 130, 151, 162
 modelo
 burbuja 131, 156, 168
 de percolación 160
 estándar 23, 82
 movimiento browniano 139, 145
 núcleo atómico 11, 12, 21, 22, 49, 53, 61, 64, 66, 67, 77, 88, 94, 95, 100, 108-111, 115, 118-123, 126, 132, 147, 154-156, 158-160, 170
 número de Avogadro 46, 58-60
 números naturales 20, 21
 ondas en el plasma 144-146
 opalescencia crítica 166, 168, 169
 oscilaciones de plasma 143, 144
 partículas alfa *véase* radiación alfa
 plasma 11, 12, 31, 50, 52, 53, 107, 118, 119, 135, 137-146, 155, 156, 159, 160, 163, 164, 169
 de quarks y gluones 13, 14, 49, 148, 154, 158, 163, 168, 169
 electromagnético 13, 146
 hadrónico 148
 predicción meteorológica 34, 155
 presión 7, 9-11, 13, 34-38, 40, 41, 43-47, 49-51, 53, 117-120, 131, 142, 153-155, 158, 164, 166
 de vapor 39, 41, 164
 principio
 de exclusión de Pauli 83-85, 104, 107, 117, 118, 123, 124, 126, 128, 139
 de incertidumbre 71, 72, 75, 117
 de Mach 24
 producción de partículas 12, 95, 130, 148, 149, 156, 158, 159, 163
 protón 11-13, 21, 49, 52, 53, 65-67, 79, 81, 85, 88, 91, 94, 95, 102, 103, 107, 109-111, 113, 115, 117, 120-126, 128, 129, 132, 135, 147-149, 157, 160, 164
 púlsar 125
 punto crítico 14, 51, 166, 168-170

QCD (cromodinámica cuántica) 12, 100, 128, 129, 134, 156, 167, 169, 169
 quark 8, 12-14, 49, 67, 100, 104, 108-110, 121, 125-134, 148, 154-159, 163, 165, 168, 169
 radiación alfa (partículas alfa) 21, 22, 64, 94, 124
 rayos catódicos 60, 62, 63, 139, 139
 regla de cálculo 29
 relatividad 9, 11, 14, 24, 46, 69, 87, 99, 97, 99, 153, 170
 renormalización 51, 99, 100, 168
 retículo de QCD 157
 Rutherford, Ernest 21, 64, 121, 128
 Schrödinger, Erwin 97
 simetría de cruce 105, 106
 sistema internacional de unidades 18
 sonido 43, 45, 72, 73, 75, 78, 87, 89, 105, 169, 170
 sucesos 86, 87, 90-93, 149, 157
 superconductividad 132
 supernova 124, 125
 temperatura 9-11, 14, 33-35, 38, 39, 41, 42, 44-47, 49-51, 53, 58, 60, 71, 80, 84, 85, 110-113, 118, 119, 122, 124, 132, 138, 139, 141-143, 145-148, 153-156, 158, 159, 164, 166, 168, 169
 de Hagedorn 153, 154
 teoría cuántica de campos 99, 104, 106, 109
 teorías fundamentales 99, 100, 110, 128
 Thomson, Joseph John 60-62, 65, 66, 138
 transformación de Lorentz 92, 93
 unidades
 en palabras de origen griego 27
 naturales 19, 21
 Van der Waals, Johannes Diderik 10, 51, 60, 112, 166
 volumen 10, 30, 35, 36, 41, 45, 46, 49-51, 59, 62, 121, 122, 149, 159, 160, 166
 Witten, Edward 132

La materia extrema

La materia en condiciones extremas ha sido un tema que ha fascinado a la humanidad desde el origen de los tiempos. ¿Cuál es la materia más fría y la más caliente? ¿Dónde se encuentran las mayores densidades? ¿Se puede calentar el vacío? El recorrido de este laberinto lógico y diabólico ha permitido comprender las leyes que rigen desde el comportamiento de los quarks hasta el propio origen del universo y la materia que conocemos y de la que estamos formados. Desde que los griegos clasificaron los estados de la materia en tierra, agua, aire y fuego, los estados extremos naturales y artificiales a veces se tocan en los puntos críticos.

Enrique Ruiz Arriola es catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear en la Universidad de Granada.